CENGAGE Learning

Ciencia e ingeniería de materiales

Donald R. Askeland
Wendelin J. Wright

7ª edición

Ciencia e ingeniería de materiales

Séptima edición

Donald R. Askeland
University of Missouri—Rolla, emérito

Wendelin J. Wright
Bucknell University

Edición SI preparada por:

D.K. Bhattacharya
Solid State Physics Laboratories, New Delhi

Raj P. Chhabra
Indian Institute of Technology, Kanpur

Traducción

Lorena Peralta Rosales
Traductora profesional

Revisión técnica

José Nicolás Ponciano Guzmán
Instituto Tecnológico de Morelia
Tecnológico de Monterrey
Campus Morelia

Leonel Ceja Cárdenas
Instituto Tecnológico de Morelia

CENGAGE Learning®

Australia • Brasil • Corea • España • Estados Unidos • Japón • México • Reino Unido • Singapur

Ciencia e ingeniería de materiales
Séptima edición
Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright

Presidente de Cengage Learning Latinoamérica:
Fernando Valenzuela Migoya

Director Editorial para Latinoamérica:
Ricardo H. Rodríguez

Gerente de Adquisiciones para Latinoamérica:
Claudia C. Garay Castro

Gerente de Manufactura para Latinoamérica:
Antonio Mateos Martínez

Gerente Editorial de Contenidos en Español:
Pilar Hernández Santamarina

Gerente de Proyectos Especiales:
Luciana Rabuffetti

Coordinador de Manufactura:
Rafael Pérez González

Editor:
Javier Reyes Martínez

Diseño de portada:
Mariana Sierra Enríquez

Imágenes de portada:
©Shutterstock

Composición tipográfica:
Rogelio Raymundo Reyna Reynoso

© D.R. 2017 por Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., una Compañía de Cengage Learning, Inc.
Corporativo Santa Fe
Av. Santa Fe núm. 505, piso 12
Col. Cruz Manca, Santa Fe
C.P. 05349, México, D.F.
Cengage Learning® es una marca registrada usada bajo permiso.
DERECHOS RESERVADOS. Ninguna parte de este trabajo amparado por la Ley Federal del Derecho de Autor, podrá ser reproducida, transmitida, almacenada o utilizada en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a lo siguiente: fotocopiado, reproducción, escaneo, digitalización, grabación en audio, distribución en Internet, distribución en redes de información o almacenamiento y recopilación en sistemas de información a excepción de lo permitido en el Capítulo III, Artículo 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor, sin el consentimiento por escrito de la Editorial.

Traducido del libro
The Science and Engineering of Materials
7th edition
Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright

Publicado en inglés por Cengage Learning © 2016
ISBN: 978-1-305-07710-2

Datos para catalogación bibliográfica:
Askeland, Donald R., Wright, Wendelin J.
Ciencia e Ingeniería de materiales
Séptima edición

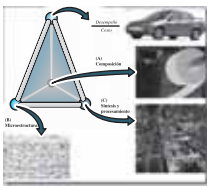
ISBN: 978-607-526-063-1

Visite nuestro sitio web en:
http://latinoamerica.cengage.com

Para Mary Sue y Tyler
–Donald R. Askeland

A John, mi amor
–Wendelin J. Wright

CONTENIDO



Capítulo 1 Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales 3

1-1 ¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales? 4
1-2 Clasificación de los materiales 7
1-3 Clasificación funcional de los materiales 10
1-4 Clasificación de los materiales con base en la estructura 12
1-5 Efectos ambientales y diversos 12
1-6 Diseño y selección de materiales 14

Resumen 15 | Glosario 6 | Problemas 17

Capítulo 2 Estructura atómica 21

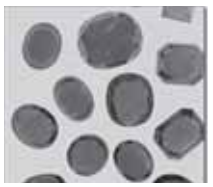
2-1 Estructura de los materiales: relevancia tecnológica 22
2-2 Estructura del átomo 25
2-3 Estructura electrónica del átomo 26
2-4 Tabla periódica 29
2-5 Enlace atómico 31
2-6 Energía de unión y espaciado interatómico 37
2-7 Las muchas formas del carbono: relaciones entre los arreglos de los átomos y las propiedades materiales 40

Resumen 44 | Glosario 45 | Problemas 47

Capítulo 3 Arreglos atómicos e iónicos 51

3-1 Orden de corto alcance frente a orden de largo alcance 52
3-2 Materiales amorfos 54
3-3 Red, base, celdas unitarias y estructuras cristalinas 54
3-4 Transformaciones alotrópicas o polimórficas 66
3-5 Puntos, direcciones y planos de la celda unitaria 67
3-6 Sitios intersticiales 76
3-7 Estructuras cristalinas de los materiales iónicos 78
3-8 Estructuras covalentes 84
3-9 Técnicas de difracción del análisis de estructuras cristalinas 87

Resumen 91 | Glosario 92 | Problemas 94



Capítulo 4 Imperfecciones en los arreglos atómicos e iónicos 103

4-1 Defectos puntuales 104
4-2 Otros defectos puntuales 109
4-3 Dislocaciones 111
4-4 Importancia de las dislocaciones 117
4-5 Ley de Schmid 118
4-6 Influencia de la estructura cristalina 120
4-7 Defectos superficiales 122
4-8 Importancia de los defectos 128

Resumen 131 | Glosario 131 | Problemas 133

Capítulo 5 Movimientos de átomos e iones en los materiales 141

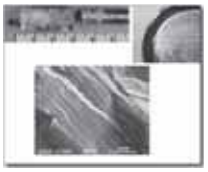
5-1 Aplicaciones de la difusión 142
5-2 Estabilidad de átomos e iones 145
5-3 Mecanismos de difusión 147
5-4 Energía de activación de la difusión 148
5-5 Velocidad de difusión [primera ley de Fick] 149
5-6 Factores que afectan la difusión 153
5-7 Permeabilidad de los polímeros 159
5-8 Perfil de composición [segunda ley de Fick] 160
5-9 Difusión y procesamiento de materiales 165

Resumen 169 | Glosario 170 | Problemas 172

Capítulo 6 Propiedades mecánicas: primera parte 181

6-1 Importancia tecnológica 182
6-2 Terminología de las propiedades mecánicas 183
6-3 Prueba de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación 185
6-4 Propiedades que se descubren a partir de la prueba de tensión 190
6-5 Esfuerzo verdadero y deformación verdadera 197
6-6 Prueba de flexión de materiales quebradizos 199
6-7 Dureza de los materiales 202
6-8 Nanoindentación 203
6-9 Efectos de la rapidez de deformación y comportamiento ante el impacto 207
6-10 Propiedades que se descubren a partir de la prueba de impacto 208
6-11 Vidrios metálicos voluminosos y su comportamiento mecánico 210
6-12 Comportamiento mecánico a escalas pequeñas de longitud 213
6-13 Reología de los líquidos 215

Resumen 217 Glosario 218 | Problemas 220



Capítulo 7 Propiedades mecánicas: segunda parte 229

7-1 Mecánica de la fractura 230
7-2 Importancia de la mecánica de la fractura 233
7-3 Características microestructurales de una fractura en materiales metálicos 236
7-4 Características microestructurales de las fracturas en cerámicas, vidrios y compuestos 239
7-5 Estadística de Weibull para analizar la resistencia a la falla 241
7-6 Fatiga 245
7-7 Resultados de la prueba de fatiga 247
7-8 Aplicación de la prueba de fatiga 249
7-9 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión por esfuerzo 252
7-10 Evaluación del comportamiento de la termofluencia 254
7-11 Uso de datos de la termofluencia 256

Resumen 257 | Glosario 258 | Problemas 259

Capítulo 8 Endurecimiento por deformación y recocido 269

8-1 Relación del trabajo en frío con la curva de esfuerzo-deformación 270
8-2 Mecanismos del endurecimiento por deformación 274
8-3 Propiedades frente al porcentaje de trabajo en frío 276
8-4 Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales 278
8-5 Características del trabajo en frío 282
8-6 Las tres etapas del recocido 285
8-7 Control del recocido 287
8-8 Recocido y procesamiento de materiales 289
8-9 Trabajo en caliente 291

Resumen 292 | Glosario 293 | Problemas 295

Capítulo 9 Principios de la solidificación 305

9-1 Importancia tecnológica 306
9-2 Formación de núcleos 307
9-3 Aplicaciones de la nucleación controlada 311
9-4 Mecanismos de crecimiento 312
9-5 Tiempo de solidificación y tamaño dendrítico 314
9-6 Curvas de enfriamiento 318
9-7 Estructura de la pieza colada 319
9-8 Defectos de solidificación 321
9-9 Procesos de vaciado para fabricar componentes 325
9-10 Colada continua y vaciado de lingotes 327

9-11 Solidificación direccional [SD], crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial 331
9-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos 332
9-13 Unión de materiales metálicos 333
Resumen 335 | Glosario 336 | Problemas 338

Capítulo 10 Soluciones sólidas y equilibrio de fases 349

10-1 Fases y diagrama de fases 350
10-2 Solubilidad y soluciones sólidas 353
10-3 Condiciones de la solubilidad sólida ilimitada 356
10-4 Endurecimiento por solución sólida 357
10-5 Diagramas de fases isomorfos 359
10-6 Relación entre las propiedades y el diagrama de fases 367
10-7 Solidificación de una aleación de solución sólida 368
10-8 Solidificación y segregación fuera de equilibrio 370
Resumen 373 | Glosario 374 | Problemas 376

Capítulo 11 Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticas 385

11-1 Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión 386
11-2 Compuestos intermetálicos 387
11-3 Diagramas de fases que contienen reacciones de tres fases 389
11-4 Diagrama de fases eutécticas 391
11-5 Resistencia de las aleaciones eutécticas 401
11-6 Eutécticos y procesamiento de materiales 406
11-7 Solidificación sin equilibrio en el sistema eutéctico 407
11-8 Nanoalambres y el diagrama de fases eutécticas 408
Resumen 410 | Glosario 411 | Problemas 412

Capítulo 12 Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico 421

12-1 Formación de núcleos y crecimiento en reacciones en estado sólido 422
12-2 Aleaciones endurecidas por exceder el límite de solubilidad 426
12-3 Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación y sus aplicaciones 428
12-4 Evolución microestructural en endurecimiento por envejecimiento o por precipitación 429
12-5 Efectos de la temperatura y del tiempo de envejecimiento 432
12-6 Requerimientos para el endurecimiento por envejecimiento 433
12-7 Uso de aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento a altas temperaturas 433
12-8 La reacción eutectoide 434

12-9 Control de la reacción eutectoide 438
12-10 La reacción martensítica y el revenido 443
12-11 Las aleaciones con memoria de forma [AMF] 447
Resumen 448 | Glosario 449 | Problemas 450

Capítulo 13 Tratamiento térmico de aceros y hierros colados 461
13-1 Designaciones y clasificación de los aceros 462
13-2 Tratamientos térmicos simples 465
13-3 Tratamientos térmicos isotérmicos 468
13-4 Tratamientos térmicos de templado y revenido 471
13-5 Efecto de los elementos de aleación 475
13-6 Aplicación de la templabilidad 477
13-7 Aceros especiales 480
13-8 Tratamientos superficiales 482
13-9 Soldabilidad del acero 484
13-10 Aceros inoxidables 485
13-11 Hierros fundidos 488
Resumen 493 | Glosario 494 | Problemas 496

Capítulo 14 Aleaciones no ferrosas 503
14-1 Aleaciones de aluminio 504
14-2 Aleaciones de magnesio y berilio 510
14-3 Aleaciones de cobre 511
14-4 Aleaciones de níquel y cobalto 515
14-5 Aleaciones de titanio 518
14-6 Metales refractarios y preciosos 524
Resumen 525 | Glosario 525 | Problemas 526

Capítulo 15 Materiales cerámicos 531
15-1 Enlace en los materiales cerámicos 533
15-2 Estructura de los materiales cerámicos cristalinos 535
15-3 Defectos en las cerámicas cristalinas 538
15-4 Fallas en los materiales cerámicos 541
15-5 Síntesis y procesamiento de los materiales cerámicos cristalinos 544
15-6 Sílice y silicatos compuestos 549
15-7 Vidrios inorgánicos 551
15-8 Vidrios-cerámicos 557
15-9 Procesamiento y aplicaciones de productos de arcilla 558

15-10 Refractarios 560
15-11 Otros materiales cerámicos 562
Resumen 564 | Glosario 564 | Problemas 566

Capítulo 16 Polímeros 571

16-1 Clasificación de los polímeros 572
16-2 Polimerización por adición y condensación 575
16-3 Grado de polimerización 579
16-4 Termoplásticos comunes 581
16-5 Relaciones estructura-propiedades en termoplásticos 583
16-6 Efecto de la temperatura en termoplásticos 587
16-7 Propiedades mecánicas de los termoplásticos 593
16-8 Elastómeros (cauchos) 598
16-9 Polímeros termoestables o termofijos 602
16-10 Adhesivos 604
16-11 Procesamiento y reciclaje de polímeros 605
Resumen 610 | Glosario 610 | Problemas 612

Capítulo 17 Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en materiales 617

17-1 Materiales compuestos endurecidos por dispersión 619
17-2 Compuestos particulados 621
17-3 Compuestos reforzados con fibras 625
17-4 Características de compuestos reforzados con fibras 629
17-5 Manufactura de fibras y compuestos 636
17-6 Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones 640
17-7 Materiales compuestos laminares 646
17-8 Ejemplos y aplicaciones de compuestos laminares 647
17-9 Estructuras tipo emparedado o sandwich 648
Resumen 650 | Glosario 650 | Problemas 651

Capítulo 18 Materiales de construcción 659

18-1 Estructura de la madera 660
18-2 Contenido de humedad y densidad de la madera 662
18-3 Propiedades mecánicas de la madera 664
18-4 Expansión y contracción de la madera 666
18-5 Madera contrachapada (triplay) 666
18-6 Materiales de concreto 667
18-7 Propiedades del concreto 669

18-8 Concreto reforzado y presforzado 673
18-9 Asfalto 674
Resumen 674 | Glosario 675 | Problemas 675

Capítulo 19 Materiales electrónicos 679

19-1 Ley de Ohm y conductividad eléctrica 681
19-2 Estructura de las bandas de sólidos 685
19-3 Conductividad de metales y aleaciones 689
19-4 Semiconductores 692
19-5 Aplicaciones de los semiconductores 699
19-6 Perspectiva general del procesamiento de un circuito integrado 702
19-7 Deposición de películas delgadas 705
19-8 Conductividad en otros materiales 706
19-9 Aislantes y sus propiedades dieléctricas 708
19-10 Polarización en dieléctricos 708
19-11 Electroestricción, piezoelectricidad y ferroelectricidad 712
Resumen 715 | Glosario 716 | Problemas 717

Capítulo 20 Materiales magnéticos 723

20-1 Clasificación de los materiales magnéticos 724
20-2 Dipolos magnéticos y momentos magnéticos 724
20-3 Magnetización, permeabilidad y campo magnético 726
20-4 Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos 729
20-5 Estructura del dominio y el ciclo de histéresis 731
20-6 La temperatura de Curie 734
20-7 Aplicaciones de los materiales magnéticos 735
20-8 Materiales magnéticos metálicos y cerámicos 741
Resumen 746 | Glosario 747 | Problemas 748

Capítulo 21 Materiales fotónicos 753

21-1 El espectro electromagnético 754
21-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión 754
21-3 Absorción, transmisión o reflexión selectivas 766
21-4 Ejemplos y uso de fenómenos de emisión 766
21-5 Sistemas de comunicaciones por fibra óptica 775
Resumen 775 | Glosario 775 | Problemas 776

Capítulo 22 Propiedades térmicas de los materiales 781

22-1 Capacidad térmica y calor específico 782
22-2 Expansión térmica 784
22-3 Conductividad térmica 788
22-4 Choque térmico 792

Resumen 793 | Glosario 794 | Problemas 794

Capítulo 23 Corrosión y desgaste 799

23-1 Corrosión química 800
23-2 Corrosión electroquímica 802
23-3 Potencial del electrodo en celdas electroquímicas 805
23-4 Corriente de corrosión y polarización 809
23-5 Tipos de corrosión electroquímica 810
23-6 Protección contra corrosión electroquímica 815
23-7 Degradación microbiana y polímeros biodegradables 820
23-8 Oxidación y otras reacciones gaseosas 821
23-9 Desgaste y erosión 824

Resumen 826 | Glosario 827 | Problemas 828

Apéndice A: Propiedades físicas de algunos metales 832
Apéndice B: Radios atómicos e iónicos de algunos elementos 835
Respuestas de problemas seleccionados 837
Índice 848

PREFACIO

La era del cobre, la era del hierro, la era del silicio… todas ellas son eras definidas por materiales que se encuentran en la naturaleza y que fueron manipulados por los ingenieros de su época. Con el tiempo, nuestra comprensión sobre el tema ha avanzado y hemos incorporado nuevas ideas sobre los principios fundamentales de la estructura, los defectos, la cinética y el procesamiento que son aplicables a todos los materiales. Como resultado, comprendemos mejor el comportamiento observable y macroscópico de los materiales, con diferentes características como resistencia mecánica, dureza, conductividad eléctrica, índice de refracción, y resistencia a la corrosión, y lo relacionamos más directamente con los fenómenos a nivel atómico.

Nuestras herramientas para la clasificación y manipulación de los materiales también han crecido de forma mucho más sofisticada, lo que nos permite tener una visión más profunda de las estructuras y fenómenos materiales. Al límite de la innovación nos encontramos con el descubrimiento, o incluso la creación de materiales totalmente nuevos, lo que a menudo es posible gracias a las nuevas técnicas de procesamiento, que aluden al equilibrio para hacer que los materiales existan en estados metaestables, así como el desarrollo de herramientas para ensamblar, formar y estudiar los materiales a nanoescala. Como ejemplo, en la actualidad resulta rutinario analizar la estructura y composición de los materiales a nivel casi atómico, así como aplicar técnicas como la microscopía de alta resolución electrónica de transmisión, la incidencia rasante de difracción de rayos X y la espectroscopia de pérdida de energía de electrones. Al mismo tiempo, el procesamiento de materiales ha avanzado hasta el punto en que se pueden generar o depositar láminas delgadas de sólo unas capas atómicas de grosor y se pueden fabricar estructuras tridimensionales con dimensiones de decenas de nanómetros o menos. Toda la industria de la electrónica se basa en estos avances. Los televisores de pantalla plana, los sistemas inalámbricos de alta velocidad de datos, las computadoras portátiles y los dispositivos de telecomunicaciones, automóviles y otros sistemas de transporte… estas y otras tecnologías dependen de nuestra comprensión de los materiales.

Aunque no todos los estudiantes de ciencias de los materiales ejercerán como ingenieros de materiales, la mayoría de los ingenieros trabajarán con un conjunto de materiales diversos como metales, cerámicas, plásticos, materiales compuestos y semiconductores, en longitudes de nanoescala a macroescala, todo dentro de un contexto de aplicaciones múltiples y diversas. Los materiales son un componente de habilitación de lo que los ingenieros pueden imaginar, diseñar y construir. La capacidad para *innovar* e incorporar materiales de manera *segura* en un diseño se basa en comprender cómo manipular las propiedades de los materiales y su funcionalidad mediante el control de la estructura y de las técnicas de procesamiento. Es por ello que el objetivo de este libro es describir los fundamentos y aplicaciones de la ciencia de los materiales para los estudiantes de ingeniería a nivel superior dentro del paradigma de estructura-procesamiento-propiedades.

El reto de cualquier libro es proporcionar el balance adecuado entre amplitud y profundidad para el tema que se estudia, a fin de suministrar el rigor en el nivel adecuado, ofrecer ejemplos significativos, contenido actualizado y estimular el entusiasmo intelectual del lector. Nuestro objetivo es proporcionar la suficiente *ciencia* para que él pueda entender los fenómenos básicos de los materiales, y la suficiente *ingeniería* para preparar a muchas generaciones de estudiantes para la práctica profesional competente.

A quién va dirigido y prerrequisitos

Este libro fue diseñado para la materia de introducción a la ciencia de los materiales a nivel de primer o segundo año. Se supone que ya hubo un primer curso en química a nivel universitario, así como algún antecedente de física universitaria. Un curso de cálculo es muy útil, pero no indispensable. El libro no presupone que los estudiantes han tomado ya otros cursos introductorios de ingeniería, como estática, dinámica, mecánica de materiales.

Lo nuevo en esta edición

Al inicio de cada capítulo se incluyen los objetivos de aprendizaje para guiar al estudiante en su avance. Se han agregado nuevos problemas al final de cada capítulo para incrementar 15% el número de los mismos. En el capítulo 15 se ha ampliado el contenido incluyendo las cerámicas cristalinas, el sílice y los silicatos, entre otros temas de interés, con la finalidad de proporcionar una visión más completa de esta clase de materiales tan importantes para la ingeniería. Además, se han revisado otras partes de este capítulo para presentarlas con mayor claridad. En el capítulo 14 se actualizó el costo de los materiales comunes de ingeniería. Como siempre, hemos tenido mucho cuidado para proporcionar un libro tan libre de errores como sea posible.

Problemas Knovel[MR]

En la parte final de los problemas de los capítulos, se encuentra una sección especial con problemas que requieren el uso de Knovel (www.knovel.com), que es un agregador en línea de referencias de ingeniería, el cual incluye manuales, enciclopedias, diccionarios, libros de texto y bases de datos de las principales editoriales técnicas y las sociedades de ingeniería, como la *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) y el *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE).

Los problemas Knovel se basan en los materiales del libro y requieren que recuperar información en línea le sea familiar. Los problemas también están disponibles en línea, con costo adicional, en www.cengage.com/engineering. Además, las soluciones están disponibles para los instructores registrados. Si su institución no tiene una suscripción o si tiene alguna pregunta sobre Knovel, comuníquese a

support@knovel.com
(210) 340-1944
(866) 324-5163

Los problemas Knovel fueron creados por un equipo de ingenieros dirigidos por Sasha Gurke, vicepresidente senior y cofundador de Knovel.

Suplementos para el instructor (Recursos disponibles en inglés sólo para docentes que utilicen como texto básico en sus clases este libro)

Los suplementos del libro incluyen el *Manual de soluciones del instructor*, que proporciona soluciones completas de problemas seleccionados y diapositivas de PowerPoint[MR] con comentarios.

El *Manual de soluciones del instructor* se encuentra disponible en unidades del SI a través de su representante de ventas o en línea, a través del sitio web del libro en www.login.cengage.com. También está disponible una versión digital de las diapositivas de PowerPoint, figuras, tablas, ejemplos y ecuaciones en SI para los docentes que se registren en el sitio web del libro.

MindTap (Recurso disponible sólo en inglés y con costo adicional)

Este libro también está disponible en línea a través MindTap, un recurso de Cengage Learning, que es un programa de aprendizaje personalizado. Los estudiantes que adquieran la versión MindTap tienen acceso al lector del libro y pueden realizar sus tareas y evaluaciones en línea, a través de su escritorio, portátil o iPad. Si está usando un sistema de administración del aprendizaje (como Blackboard o Moodle) para el seguimiento de los contenidos del curso, tareas y calificaciones, puede acceder sin problemas a la suite de contenidos y evaluaciones de MindTap para este curso.

En MindTap, los docentes pueden:

- Personalizar la ruta de aprendizaje para que coincida con el programa del curso, reordenando el contenido o añadiendo material original al contenido en línea.
- Conectar un portal del Sistema de Administración del Aprendizaje y a un lector para el curso en línea.
- Personalizar las evaluaciones y tareas en línea.

- Hacer seguimiento del progreso y el aprovechamiento de los estudiantes.
- Promover la participación de los estudiantes por medio de ejercicios interactivos.

Además, los estudiantes pueden escuchar el texto a través de ReadSpeaker, tomar notas, crear sus propias guías, subrayar el contenido para facilitar su consulta y comprobar su comprensión del material mediante tareas y evaluaciones prácticas.

Agradecimientos

Agradecemos a todos aquellos que han contribuido al éxito de las ediciones anteriores y también a los revisores que proporcionaron retroalimentación detallada y constructiva sobre la sexta edición:

Cynthia W. Barnicki, Milwaukeee School of Engineering

Deborah Chung, University of Buffalo, SUNY

Margaret Pinnell, University of Dayton

Stephen W. Stafford, University of Texas, El Paso

También agradecemos a Jeffrey Florando del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore por sus comentarios sobre las revisiones del capítulo 15.

Estamos agradecidos con el equipo de Cengage Learning, quienes han guiado cuidadosamente esta séptima edición a través de todas las etapas del proceso de publicación. En particular a Timoteo Anderson, editor de Ingeniería Global; Eavan Cully e Hilda Gowans, editores de desarrollo; Rose Kernan, editor de producción; Kristiina Paul, investigación de permisos y fotografías; Ashley Kaupert, asistente de medios de comunicación; y Sam Roth, asistente del equipo. También agradecemos a Stephen Stafford y Keith McIver por los nuevos problemas al final de los capítulos de esta edición.

Wendelin Wright agradece a Briana Rey y Joanne Mowen por su ayuda durante el proceso de revisión, así como a John Bravman de la Universidad de Bucknell por su retroalimentación, ilustraciones, paciencia y apoyo constante.

Donald R. Askeland
University of Missouri — Rolla, emérito

Wendelin J. Wright
Bucknell University

PREFACIO A LA EDICIÓN CON BASE EN EL SISTEMA INTERNACIONAL

Esta edición de Ciencia e Ingeniería de Materiales ha sido adaptada para incorporar en todo el libro el Sistema Internacional de Unidades (Le Système International d'Unité o SI).

Le Système International d'Unité

El Sistema tradicional de Estados Unidos (USCS, por sus siglas en inglés) utiliza unidades FPS (pie-libra-segundo) y también se conoce como sistema inglés o de unidades imperiales. Las unidades del SI son principalmente las unidades del sistema MKS (metro-kilogramo-segundo), pero también acepta las unidades CGS (centímetro-gramo-segundo), sobre todo en los libros de texto.

Unidades del SI en este libro

En este libro hemos utilizado tanto unidades MKS como CGS. Las unidades USCS o unidades de FPS utilizadas en la edición estadounidense del libro han sido convertidas a unidades SI en todos los problemas y en todo el texto. Sin embargo, en el caso de los datos procedentes de manuales, normas de gobierno y manuales de productos, no sólo es extremadamente difícil convertir todos los valores a SI, sino que también infringe la propiedad intelectual de la fuente. Es por ello que algunos datos en las figuras, tablas y referencias permanecen en unidades de FPS.

Para resolver los problemas que requieren el uso de datos de origen, se pueden convertir los valores de origen en unidades FPS a unidades SI, justo antes de que emplearlos en los cálculos. Para obtener cantidades estandarizadas y los datos del fabricante en unidades del SI, los lectores pueden comunicarse con los organismos o autoridades gubernamentales apropiadas en sus países y regiones.

Agradeceremos la retroalimentación de los usuarios de esta edición SI, ya que nos ayudará a mejorar las ediciones posteriores.

Cengage Learning

ACERCA DE LOS AUTORES

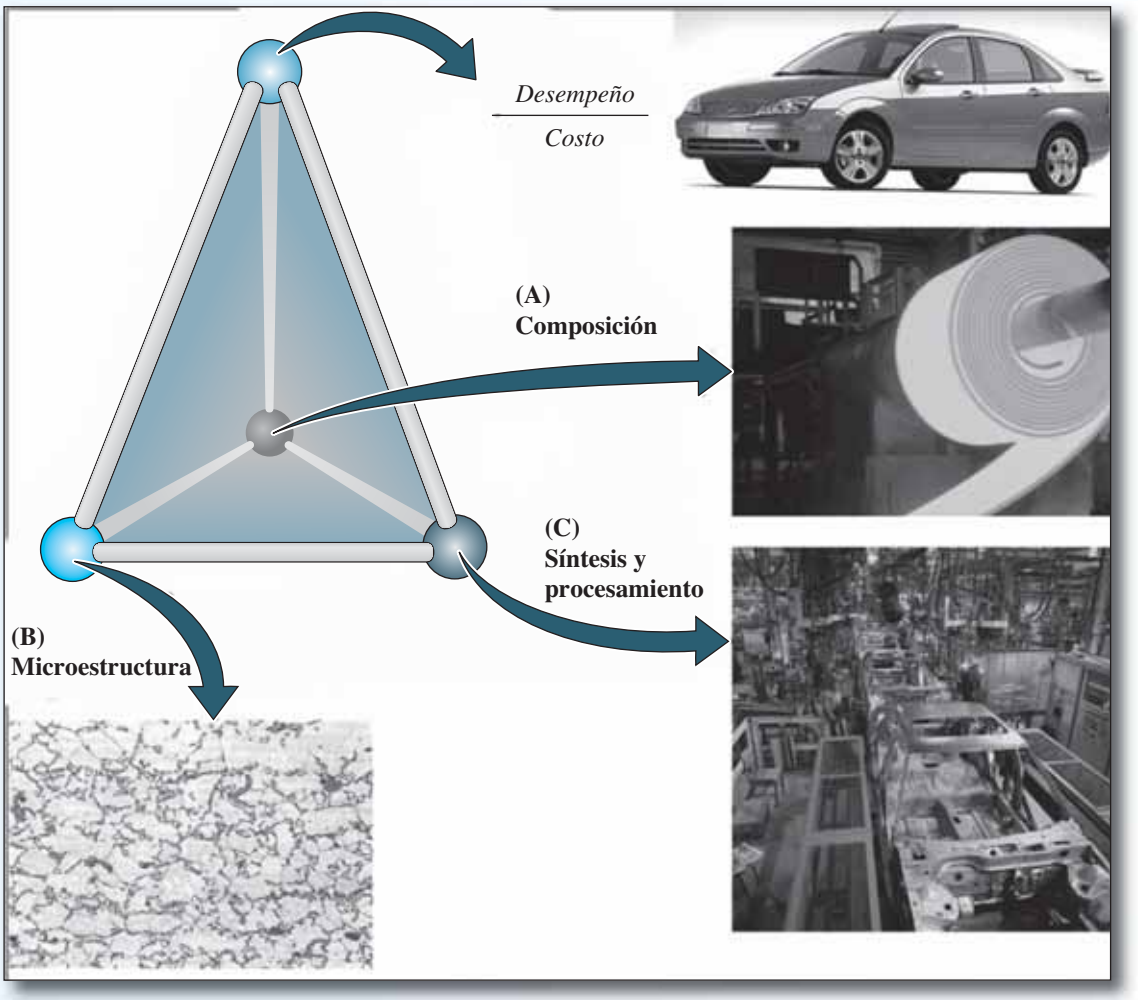
Donald R. Askeland es profesor emérito distinguido de ingeniería metalúrgica en la University of Missouri-Rolla. Obtuvo sus títulos de la Thayer School of Engineering en Darthmouth College y de la University of Michigan antes de unirse al equipo docente de la University of Missouri-Rolla en 1970. El doctor Askeland imparte varios cursos de ingeniería y producción de materiales a estudiantes en diversos planes de estudio de ingeniería y ciencias. Recibió varios premios a la excelencia en la enseñanza y asesoría en la UMR. Fungió como Key Professor para la Foundry Educational Foundation y ganó varios premios por su servicio a esa organización. Su enseñanza e investigación estaban dirigidas principalmente a la fundición y adhesión de metales, en particular la fundición de espuma perdida, lo cual dio por resultado más de 50 publicaciones y numerosos reconocimientos por servicio y mejores artículos de la American Foundry Society.

Wendelin Wright es profesora asociada de la Bucknell University con un nombramiento conjunto en los departamentos de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química. Obtuvo sus grados de ingeniería, maestría y doctorado en ciencia de los materiales e ingeniería en la Stanford University. Después de su graduación, trabajó en un periodo posdoctoral en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en la División de Ingeniería de Fabricación y Materiales, y luego regresó a Stanford como profesora adjunta en 2005. Se unió al equipo docente de la Santa Clara University en 2006 como profesora titular asistente y asumió su cargo en Bucknell en el otoño de 2010.

Los intereses de investigación de la profesora Wright se centran en el comportamiento mecánico de los materiales, en particular de los vidrios metálicos. En 2003 obtuvo el Premio Walter J. Gores a la excelencia, que es la máxima distinción de la Stanford University para la enseñanza; en 2005 ganó el premio *Presidential Early Career* para científicos e ingenieros, y en 2010 el premio *National Science Foundation CAREER*. La profesora Wright es ingeniera profesional especializada en metalurgia en California.

Ciencia e ingeniería de materiales

Séptima edición



Los objetivos principales de un científico e ingeniero de materiales son 1) mejorar los materiales existentes y 2) inventar o descubrir nuevos fenómenos, materiales, dispositivos y aplicaciones. Los avances en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales se aplican a otros campos de estudio como la ingeniería biomédica, la física, la química, la ingeniería ambiental y la tecnología de información. El tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales que se muestra aquí representa el corazón y el alma de este campo y ejemplifica su empleo para producir acero para construir el bastidor de un automóvil. Como se muestra en este diagrama, el objetivo principal de un científico e ingeniero de materiales es desarrollar materiales o dispositivos que tengan el mejor desempeño en una determinada aplicación. En la mayoría de los casos, la razón desempeño/costo, a diferencia de sólo el desempeño, es de importancia máxima. El concepto se muestra como el vértice del tetraedro y las tres esquinas son representativas de A, la composición; B, la microestructura; y C, la síntesis y el procesamiento de materiales. Ellas están interconectadas y en última instancia afectan la razón desempeño/costo de un material o un dispositivo. La micrografía adjunta muestra la microestructura del acero inoxidable, diseñada para absorber energía durante las colisiones automovilísticas. Las partículas duras llamadas martensitas (oscuras) se dispersan en una matriz de ferritas relativamente blandas y dúctiles de color claro.

Para los científicos e ingenieros de materiales, los materiales son como la paleta de colores para un artista. Al igual que estos, que pueden crear distintas pinturas con base en diferentes colores, los científicos de materiales crean y mejoran distintos materiales por medio del empleo de diversos elementos de la tabla periódica y diferentes rutas de síntesis y procesamiento. (*Michael Shake/Shutterstock.com / Digital Vision/Getty Images / Digital Vision/Getty Images* / Metals Handbook, *Desk Edition (1998), ASM International, Materials Park, OH 440730002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org)*)

CAPÍTULO

1

Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Qué estudian los científicos e ingenieros de materiales?*
- *¿Cómo se puede mejorar de forma significativa la eficiencia del combustible de un avión comercial con base en los materiales que se utilizan para su construcción?*
- *¿Si pueden fabricarse circuitos electrónicos flexibles y ligeros utilizando plásticos?*
- *¿Por qué los joyeros adicionan cobre al oro?*
- *¿Qué es un "material inteligente"?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Entender los conceptos principales que definen a la ciencia e ingeniería de materiales.
- Comprender el papel de la ciencia de materiales en el proceso de diseño.
- Clasificar los materiales con base en sus propiedades.
- Clasificar los materiales con base en su función.

En primer lugar este capítulo lo introducirá en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales (CIM) por medio de diferentes ejemplos reales. Después lo introducirá a la clasificación de los materiales. Aunque la mayoría de los programas de ingeniería requieren que los estudiantes tomen un curso de ciencia de materiales, usted debe abordar el estudio de esta disciplina como algo más que una mera exigencia pedagógica. Un conocimiento profundo de la ciencia e ingeniería de materiales lo hará un mejor ingeniero y diseñador. La ciencia de materiales es la base de todos los avances tecnológicos, por lo que la comprensión de los conceptos básicos de los materiales y sus aplicaciones no sólo lo harán un mejor ingeniero, también lo ayudarán durante el proceso de diseño. Para ser un buen diseñador debe aprender cuáles materiales son apropiados para utilizar en distintas aplicaciones. Debe ser capaz de elegir el material correcto para su aplicación con base en sus propiedades, así como reconocer cómo podrían cambiar estas propiedades con el tiempo y debido al procesamiento. Cualquier ingeniero puede consultar las propiedades de los materiales en un libro o buscar en bases de datos un material que cumpla las especificaciones del diseño, pero

la **habilidad para innovar** e **incorporar materiales de manera segura** en un diseño tiene sus orígenes en la comprensión de cómo manipular sus propiedades y funcionalidades a través del control de la estructura y de las técnicas de procesamiento del material.

El aspecto más importante de los materiales es que se pueden hacer ciertas cosas con ellos, es decir, permiten que sucedan las cosas. Por ejemplo, en la historia de la civilización, materiales como la piedra, el hierro y el bronce desempeñaron funciones clave en el desarrollo de la humanidad. En el mundo vertiginoso actual, el descubrimiento de los monocristales de silicio y la comprensión de sus propiedades han permitido el desarrollo de la era de la información.

En este libro se proporcionan ejemplos convincentes de aplicaciones reales de los materiales de ingeniería. La diversidad de aplicaciones y los usos únicos de los materiales ilustran por qué un buen ingeniero debe comprender y conocer cómo aplicar los principios de la ciencia e ingeniería de materiales.

1-1 ¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales?

La **ciencia e ingeniería de materiales** (**CIM**) es un campo interdisciplinario que estudia y manipula la composición y estructura de los materiales a través de escalas de longitud para controlar las propiedades de los materiales por medio de la síntesis y el procesamiento. El término **composición** se refiere a la constitución química de un material. Por su parte, el vocablo **estructura** se remite a la descripción del arreglo de los átomos, es decir, cómo se observa a diferentes niveles de detalle. Los científicos e ingenieros de materiales no sólo se enfocan en el desarrollo de materiales, sino también en su **síntesis** y **procesamiento** y en los procesos de manufactura relacionados con la producción de componentes. El término "síntesis" se refiere a la forma en que se fabrican materiales a partir de sustancias químicas de estado natural o hechas por el hombre. El término "procesamiento" implica cómo se transforman materiales en componentes útiles para provocar cambios en las propiedades de diferentes materiales. Una de las funciones más importantes de los científicos e ingenieros que estudian esta disciplina es establecer las relaciones entre las propiedades de un material o un dispositivo y el desempeño y la microestructura del material, su composición y la manera en la que el material o dispositivo se sintetizó y procesó. La **ciencia de materiales** se enfoca en las relaciones básicas entre la síntesis y el procesamiento, la estructura y las propiedades de los materiales. Por su parte, la **ingeniería de materiales** se concentra en las formas de convertir o transformar los materiales en dispositivos o estructuras útiles.

Uno de los aspectos más fascinantes de la ciencia de materiales involucra la investigación de la estructura de un material. La estructura de los materiales tiene una influencia profunda sobre muchas propiedades de estos, ¡aún si la composición general no cambia! Por ejemplo, si toma un alambre de cobre puro y lo dobla de manera repetida, ¡el alambre no sólo se endurece sino que también se vuelve cada vez más quebradizo! Con el tiempo, el alambre de cobre puro se hace tan duro y quebradizo ¡que se romperá! La resistividad eléctrica del alambre también aumentará a medida que se doble de manera repetida. En este ejemplo sencillo, observe que no se modificó la composición del material (es decir, su constitución química). Los cambios en las propiedades del material se deben a un cambio en su estructura interna. Si examina el alambre después de doblarse observará lo mismo que antes; sin embargo, su estructura ha cambiado a escala microscópica. A escala microscópica, la estructura se conoce como **microestructura**. Si es posible comprender lo que ha cambiado de forma microscópica, se comenzarán a descubrir maneras de controlar las propiedades de los materiales.

Examine un ejemplo utilizando el **tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales** que se presenta en la figura 1-1. (En la página de apertura del capítulo se ofrece otro ejemplo). Durante la mayor parte de la historia de la aviación comercial, los fuselajes de los aviones se fabricaron con aleaciones de aluminio. El material del fuselaje debe poseer una resistencia suficientemente alta y a la vez ser ligero y moldeable en contornos aerodinámicos. El aluminio es un material que cumple con estos requisitos. En 2011, los pasajeros comenzaron a viajar en los aviones 787 Dreamliner de Boeing. Una de sus innovaciones principales es el uso extensivo de **materiales compuestos,** es decir, aquellos que se forman mediante la incorporación de componentes múltiples en un material, de manera que las propiedades de la combinación resultante son únicas y no se podrían obtener de otro modo. Los materiales compuestos representan la mitad del peso total del Dreamliner y su fuselaje está hecho de plástico reforzado con fibra de carbono. El plástico reforzado con fibra de carbono es un compuesto de fibra de carbono en una matriz de resina epoxi de polímero.

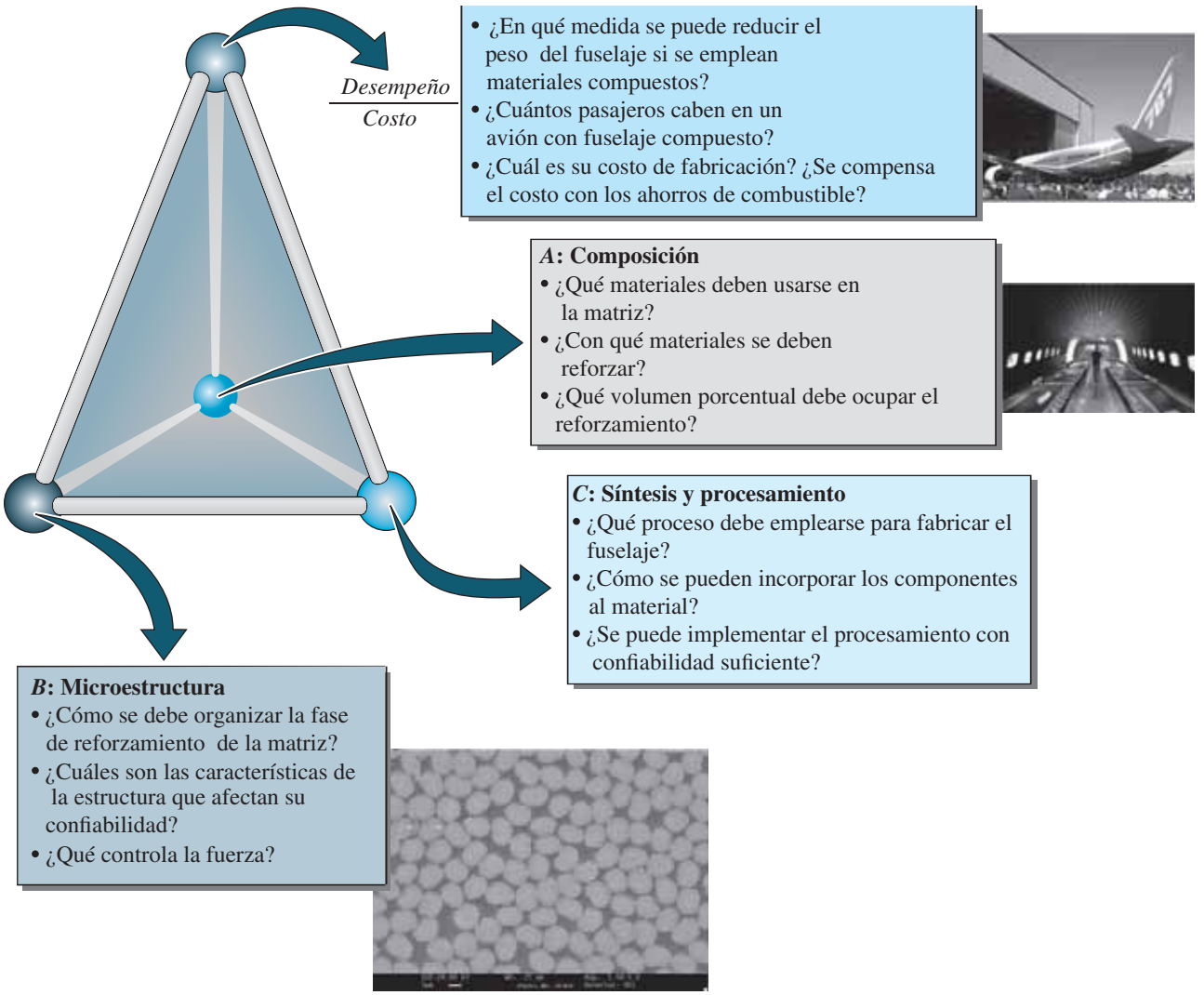


Figura 1-1 Aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales a los plásticos reforzados de fibras de carbono para fabricar fuselajes de aeronaves. Observe que la composición, la microestructura y la síntesis-procesamiento están interconectadas y afectan la razón desempeño/costo. Aparecen en el sentido de las manecillas del reloj a partir del lado superior derecho: el Boeing 787, el interior del fuselaje vacío de un Boeing 787, fibra de carbono en una matriz epoxi. [*Bloomberg* a través de Getty Images / Srinivasa, Vinod, Shivakumar, Vinay, Nayaka, Vinay, Jagadeeshaiaih, Sunil, Seethram, Murali, Shenoy, Raghavendra, & Nafidi, Abdelhakim. (2010). *Fracture morphology of carbon fiber reinforced plastic composite laminates*. Materials Research, vol. 13(3), pp. 417-424. Recuperado el 6 de enero de 2014 de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392010000300022&lng=en&tlng=en. 10.1590/S1516 -14392010000300022./ AFP/Getty Images / Aviation Images]

Después de varias décadas de fabricar modelos exitosos de aviones, Boeing invirtió miles de millones de dólares para desarrollar un avión comercial con base en una nueva clase de materiales. ¿Por qué tomó esta decisión? La principal motivación para usar plástico reforzado con fibras de carbono fue reducir el peso del fuselaje para incrementar la eficiencia del combustible, lo que también ha aumentado la razón desempeño/costo de la aeronave.

El cambio hacia el uso de materiales compuestos implicó una gran cantidad de retos técnicos. ¿Qué material compuesto se debería emplear? ¿Cómo se dará forma al fuselaje? Los datos recabados durante décadas demuestran que se forman grietas en el aluminio como resultado de los despegues y aterrizajes. ¿El nuevo material compuesto será confiable? ¿Un plástico reforzado con fibra de carbono tendrá la misma resistencia a la corrosión que el aluminio o experimentará una

deslaminación entre los plásticos y las fibras? Las aeronaves de aluminio tienen paneles estructurales remachados. ¿Cómo se unirán los componentes estructurales del material compuesto? En este análisis podemos observar que es necesario considerar muchas cuestiones durante el proceso de diseño y la selección de materiales de cualquier producto, además de que la razón desempeño/costo, la composición, la microestructura y la síntesis y el procesamiento son factores críticos.

Un ejemplo más de la aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales es el empleo de una clase de materiales conocidos como polímeros semiconductores (figura 1-2) en dispositivos microelectrónicos. Muchos tipos de pantallas, como las que se encuentran en los despertadores y los relojes, usan diodos emisores de luz (light emiting diodes, LED) elaborados con compuestos inorgánicos basados en arseniuro de galio (GaAs) y otros materiales. La ventaja del uso de plásticos en la microelectrónica es que son flexibles y fáciles de procesar. Las preguntas que deben responder los científicos e ingenieros en materiales sobre las aplicaciones de los polímeros semiconductores son

- ¿Cuáles son las relaciones entre la estructura de los polímeros y sus propiedades eléctricas?
- ¿Cómo pueden fabricarse dispositivos con el empleo de estos plásticos?
- ¿Estos dispositivos serán compatibles con la tecnología del chip de silicio existente?
- ¿Cuán robustos son estos dispositivos?
- ¿Cómo se compararán el desempeño y el costo de estos dispositivos con los dispositivos tradicionales?

Estos son sólo algunos de los factores que los ingenieros y científicos deben considerar durante el desarrollo, diseño y fabricación de los dispositivos de polímeros semiconductores.

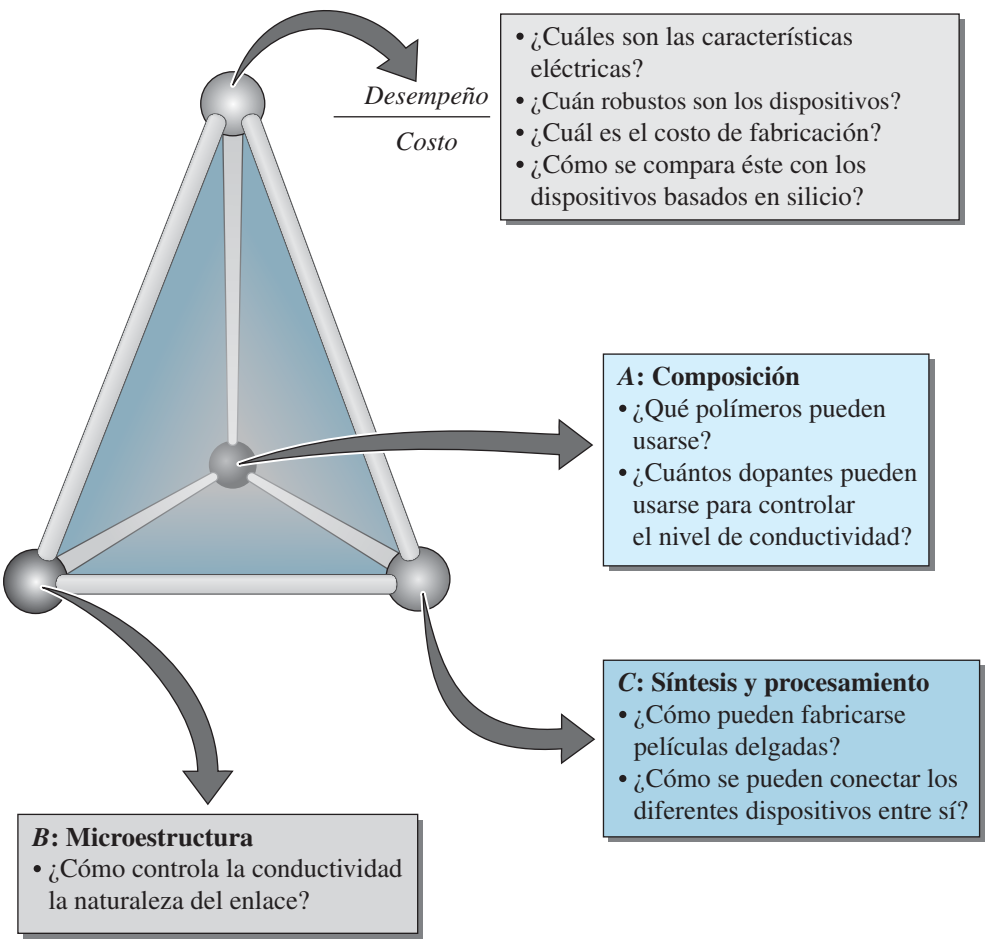


Figura 1-2 Aplicación del tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales a polímeros semiconductores en microelectrónica.

1-2 Clasificación de los materiales

Existen formas diferentes de clasificar los materiales. Una de ellas es describir cinco grupos (tabla 1-1):

1. **Metales** y **aleaciones**
2. **Cerámicas**, **vidrios y vidrios cerámicos**
3. **Polímeros** (plásticos)
4. **Semiconductores** y
5. **Materiales compuestos**

Tabla 1.1 Ejemplos, aplicaciones y propiedades representativas de cada categoría de materiales

	Ejemplos de aplicaciones	Propiedades
Materiales y aleaciones		
Cobre	Alambre conductor eléctrico	Conductividad eléctrica alta, buena formabilidad
Hierro colado gris	Bloques de motores de automóviles	Moldeable, maquinable, amortiguador de vibraciones
Aceros de aleación	Llaves inglesas, chasis de automóviles	Endurecimiento significativo por tratamiento térmico
Cerámicas y vidrios		
SiO_2-Na_2O-CaO	Vidrios de ventanas	Ópticamente transparente, aislante térmico
Al_2O_3, MgO, SiO_2	Refractarios (es decir, recubrimientos resistentes al calor de horno) para contener metal fundido	Aislantes térmicos, soportan altas temperaturas, relativamente inertes al metal fundido
Titanato de bario	Capacitores para microeléctrica	Alta capacidad de almacenamiento de carga
Sílice	Fibras ópticas para tecnología de la información	Pérdidas ópticas bajas
Polímeros		
Polietileno	Empaquetamiento de alimentos	Fácilmente convertible en películas delgadas, flexibles y herméticas
Epoxi	Encapsulado de circuitos integrados	Aislante de electricidad y resistente a la humedad
Fenólicos	Adhesivos para unir capas de madera laminada	Fuertes, resistentes a la humedad
Semiconductores		
Silicio	Transistores y circuitos integrados	Comportamiento eléctrico único
GaAs	Sistemas optoelectrónicos	Convierte señales eléctricas en luz, se usa en láseres, diodos láser, etc.
Compuestos		
Grafito-epoxi	Componentes para aviones	Razón resistencia/peso alta
Carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co)	Herramientas de corte de carburo para maquinado	Dureza alta, pero buena resistencia al impacto
Acero revestido de titanio	Contenedores de reactores	Costo bajo y resistencia alta del acero con la resistencia a la corrosión del titanio

Los materiales que integran cada uno de estos grupos poseen estructuras y propiedades distintas. Las diferencias en resistencia, las cuales se comparan en la figura 1-3, ilustran el amplio intervalo de propiedades a partir de las cuales pueden seleccionar los ingenieros. Dado que los materiales metálicos se usan en gran medida en aplicaciones para soportar cargas, sus propiedades mecánicas son de gran interés práctico. Aquí se introducirán de manera breve. El término "esfuerzo" se refiere a la carga o fuerza por unidad de área. La "deformación unitaria" se relaciona con la elongación o cambio en dimensión dividido entre la dimensión original. La aplicación del esfuerzo provoca la "deformación". Si la deformación desaparece después de que se retira la carga o el "esfuerzo" aplicado, se dice que la deformación es "elástica". Por el contrario, si permanece después de que se elimina el esfuerzo, se dice que es "plástica". Cuando la deformación es elástica, el esfuerzo y la deformación están relacionados de manera lineal; a la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación unitaria se le conoce como módulo elástico o de Young. Al nivel de esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica se le denomina "límite elástico". El porcentaje máximo de deformación que se puede obtener es una medida de la ductilidad de un material metálico. Estos conceptos se explicarán más adelante en los capítulos 6 y 7.

Metales y aleaciones

Los metales incluyen aluminio, magnesio, zinc, hierro, titanio, cobre y níquel. Una aleación es un metal que contiene adiciones de uno o más metales o no metales; por ejemplo, el acero es una aleación de hierro con adiciones de carbono. En general, los metales tienen buenas conductividades eléctricas y térmicas. Además, igual que las aleaciones tienen resistencias relativamente altas, gran rigidez, ductilidad o formabilidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles para aplicaciones estructurales o de carga. Aunque en ocasiones se usan metales puros, las aleaciones pueden mejorar una propiedad deseable específica o permiten mejores combinaciones de las propiedades. Por ejemplo, el oro puro es un metal blando, por lo que los joyeros le adicionan cobre para mejorar su resistencia con la finalidad de que las joyas de oro no se dañen con facilidad.

Cerámicas

Las cerámicas pueden definirse como materiales cristalinos inorgánicos. La arena de playa y las rocas son ejemplos de cerámicas en estado natural. Las cerámicas avanzadas, que son materiales preparados por medio de la refinación de cerámicas de estado natural y otros procesos especiales, se usan en los sustratos que albergan chips de computadora, sensores y activadores, capacitores, comunicaciones inalámbricas, generadores de chispa, inductores y aislantes eléctricos. Algunas cerámicas se utilizan como recubrimientos de barrera para proteger los sustratos metálicos en

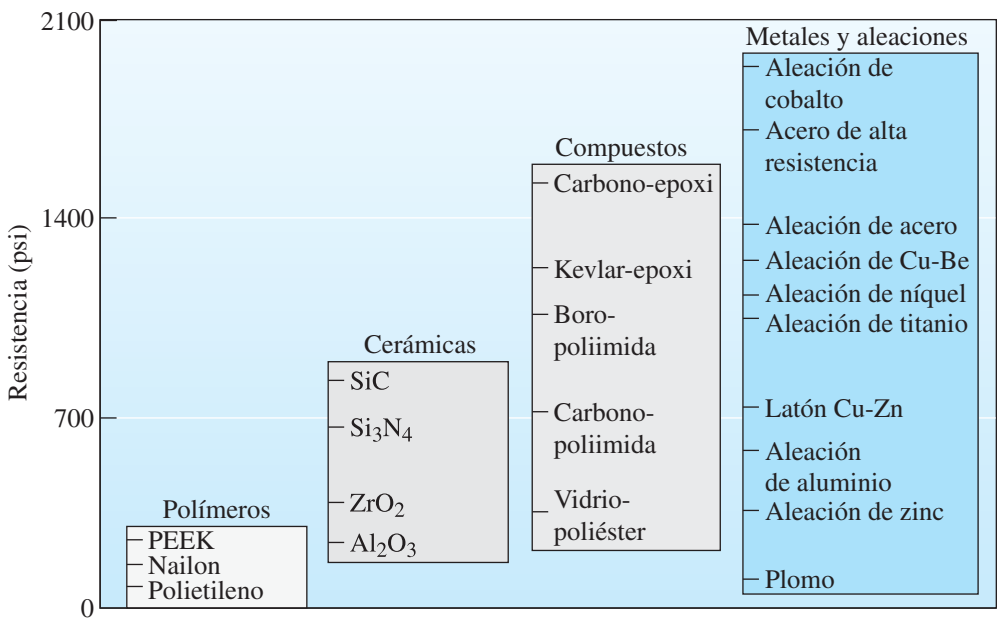


Figura 1-3 Resistencias representativas de varias categorías de materiales. Se muestra la resistencia de las cerámicas a la compresión.

motores de turbinas. También se usan en productos de consumo como pinturas, plásticos, neumáticos y en aplicaciones industriales como los sensores de oxígeno que usan los automóviles. Se recurre a las cerámicas tradicionales para fabricar ladrillos, vajillas, accesorios de baño, refractarios (material resistente al calor) y abrasivos. En general, las cerámicas no conducen bien el calor, y deben calentarse a temperaturas muy altas antes de fundirse. Asimismo, son resistentes y duras, pero también son quebradizas. Por lo regular se preparan polvos finos de cerámicas y se convierten en distintas formas. Las nuevas técnicas de procesamiento permiten fabricar cerámicas lo suficientemente resistentes a la fractura que pueden utilizarse en aplicaciones de carga, como los impulsores en los motores de turbinas. Las cerámicas tienen una resistencia excepcional bajo compresión. ¿Puede creer que todo un camión de bomberos puede soportarse con ayuda de cuatro tazas de cerámica para café?

Vidrios y vidrios-cerámicos El vidrio es un material amorfo; con frecuencia, aunque no siempre, derivado de un líquido fundido. El término "amorfo" se refiere a materiales que no poseen un arreglo regular y periódico de átomos. Los materiales amorfos se explicarán en el capítulo 3. La industria de la fibra óptica se basa en fibras ópticas compuestas por vidrios de sílice de alta pureza. Los vidrios también se usan en casas, automóviles, pantallas de computadoras, televisores, smartphones y en cientos de otras aplicaciones. Los vidrios pueden tratarse de manera térmica (templarse) para hacerlos más resistentes. La formación de vidrios y la nucleación (formación) de cristales pequeños dentro de ellos por medio de un proceso térmico especial crean materiales a los que se conoce como vidrios-cerámicos. El Zerodur[MR] es un ejemplo de un material de vidrio-cerámico que se usa para construir los sustratos de espejos para grandes telescopios (por ejemplo, los telescopios Chandra y Hubble). Por lo general, los vidrios y los vidrios-cerámicos se procesan por fusión y colado.

Polímeros Por lo general, los polímeros son materiales orgánicos. Se producen por medio de un proceso conocido como **polimerización**. Los materiales poliméricos incluyen al caucho (elastómeros) y muchos tipos de adhesivos. Los más comunes son buenos aislantes eléctricos y térmicos, aunque existen excepciones. A pesar de que poseen una resistencia más baja que los metales o las cerámicas, los polímeros tienen una muy buena **razón resistencia/peso**. Por lo regular no se pueden usar a altas temperaturas, pero muchos de ellos tienen muy buena resistencia a sustancias químicas corrosivas. Además, tienen miles de aplicaciones que van desde chalecos antibalas, discos compactos (CD), cuerdas y pantallas de cristal líquido (LCD) hasta vestimenta y tazas para café. Los polímeros **termoplásticos**, en los que las cadenas moleculares grandes no están conectadas de manera rígida, tienen buena ductilidad y formabilidad; los polímeros **termoestables** son más resistentes, pero más quebradizos, debido a que las cadenas moleculares están enlazadas de manera cruzada (figura 1-4). Todos ellos se usan en muchas aplicaciones, entre las cuales se encuentran diversos dispositivos electrónicos. Los termoplásticos se fabrican moldeando su forma

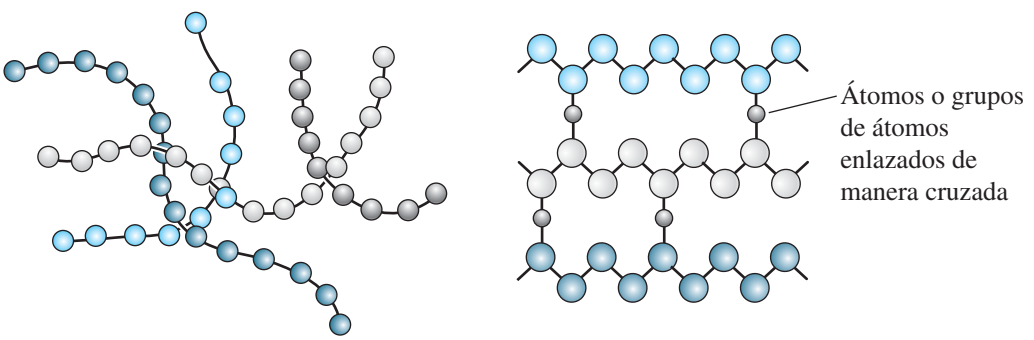


Figura 1-4 La polimerización ocurre cuando se combinan moléculas pequeñas, representadas por los círculos, para producir moléculas más grandes, o polímeros. Las moléculas de estos pueden tener una estructura que consiste en varias cadenas que estén enredadas pero no conectadas (termoplásticos) o pueden formar redes tridimensionales en las cuales las cadenas tienen enlaces cruzados (termoestables).

fundida. Por lo general, los termoestables se cuelan en moldes. Los **plásticos** contienen aditivos que mejoran las propiedades de los polímeros.

Semiconductores Los semiconductores basados en silicio, germanio y arseniuro de galio, como los que se usan en computadoras y dispositivos electrónicos son parte de una amplia clase de materiales conocidos como materiales electrónicos. La conductividad eléctrica de los materiales semiconductores se encuentra entre la de los aislantes cerámicos y la de los conductores metálicos. Los semiconductores han permitido la era de la información. En algunos de ellos el nivel de conductividad puede controlarse para producir dispositivos electrónicos, como transistores y diodos, que se usan para construir circuitos integrados. En muchas aplicaciones se necesitan monocristales grandes de semiconductores que se producen a partir de materiales fundidos. Con frecuencia, también se fabrican películas delgadas de materiales semiconductores mediante procesos especializados.

Materiales compuestos La idea principal que subyace al desarrollo de compuestos es combinar las propiedades de distintos materiales. Se forman a partir de dos o más materiales, lo cual genera propiedades que no se encuentran en ningún material simple. El concreto, la madera laminada y la fibra de vidrio son ejemplos de materiales compuestos. La fibra de vidrio se prepara por medio de la dispersión de fibras de vidrio en una matriz de polímero. Dichas fibras otorgan mayor rigidez al polímero, pero no incrementan de forma significativa su densidad. Con los compuestos se pueden producir materiales ligeros, resistentes, dúctiles y resistentes a las temperaturas, o herramientas de corte rígidas, pero resistentes al impacto que de otra manera las rompería. En gran medida, los aviones avanzados y los vehículos aeroespaciales dependen de materiales compuestos. Como se analizó en secciones anteriores, el Boeing 787 usa plástico reforzado con fibras de carbono en lugar de aluminio en muchos de sus componentes, lo que mejora el rendimiento del combustible. Ciertos equipos deportivos como bicicletas, palos de golf, raquetas de tenis y similares también emplean distintos tipos de materiales compuestos que son ligeros y rígidos.

1-3 Clasificación funcional de los materiales

Los materiales se pueden clasificar con base en la función más importante que desempeñan, es decir, si dicha función es mecánica (estructural), biológica, eléctrica, magnética u óptica. Esta clasificación de los materiales se presenta en la figura 1-5, donde también se muestran algunos ejemplos de cada categoría. Estas categorías pueden dividirse en subcategorías.

Aeroespaciales En el vuelo histórico de los hermanos Wright se usaron materiales ligeros como madera y una aleación de aluminio (que de manera accidental le dio aún más resistencia al motor cuando se contaminó con el cobre del molde que se usó para su colado). En la actualidad, el transbordador espacial de la NASA usa polvo de aluminio para construir cohetes impulsores y sílice para fabricar los lazos. El fuselaje y las alas del Boeing 787 están compuestas principalmente por plástico reforzado con fibras de carbono.

Biomédicos Los huesos y dientes están constituidos, en parte, por una cerámica formada de manera natural conocida como hidroxiapatita. Varios órganos artificiales, partes de reemplazo de huesos, cánulas cardiovasculares, aparatos de ortodoncia y otros componentes se fabrican con diferentes plásticos, aleaciones de titanio y aceros inoxidables no magnéticos. Los sistemas de imagen ultrasónica usan cerámicas conocidas como PZT (titanato de zirconio de plomo).

Materiales electrónicos Como ya se mencionó, los semiconductores, como los que se fabrican de silicio, se usan para fabricar circuitos integrados para chips de computadoras. El titanato de bario ($BaTiO_3$), el óxido de tantalio (Ta_2O_5) y muchos otros materiales dieléctricos se emplean para fabricar capacitores cerámicos y otros dispositivos. El cobre, el aluminio y otros metales se usan como conductores en la transmisión de electricidad y en la microelectrónica.

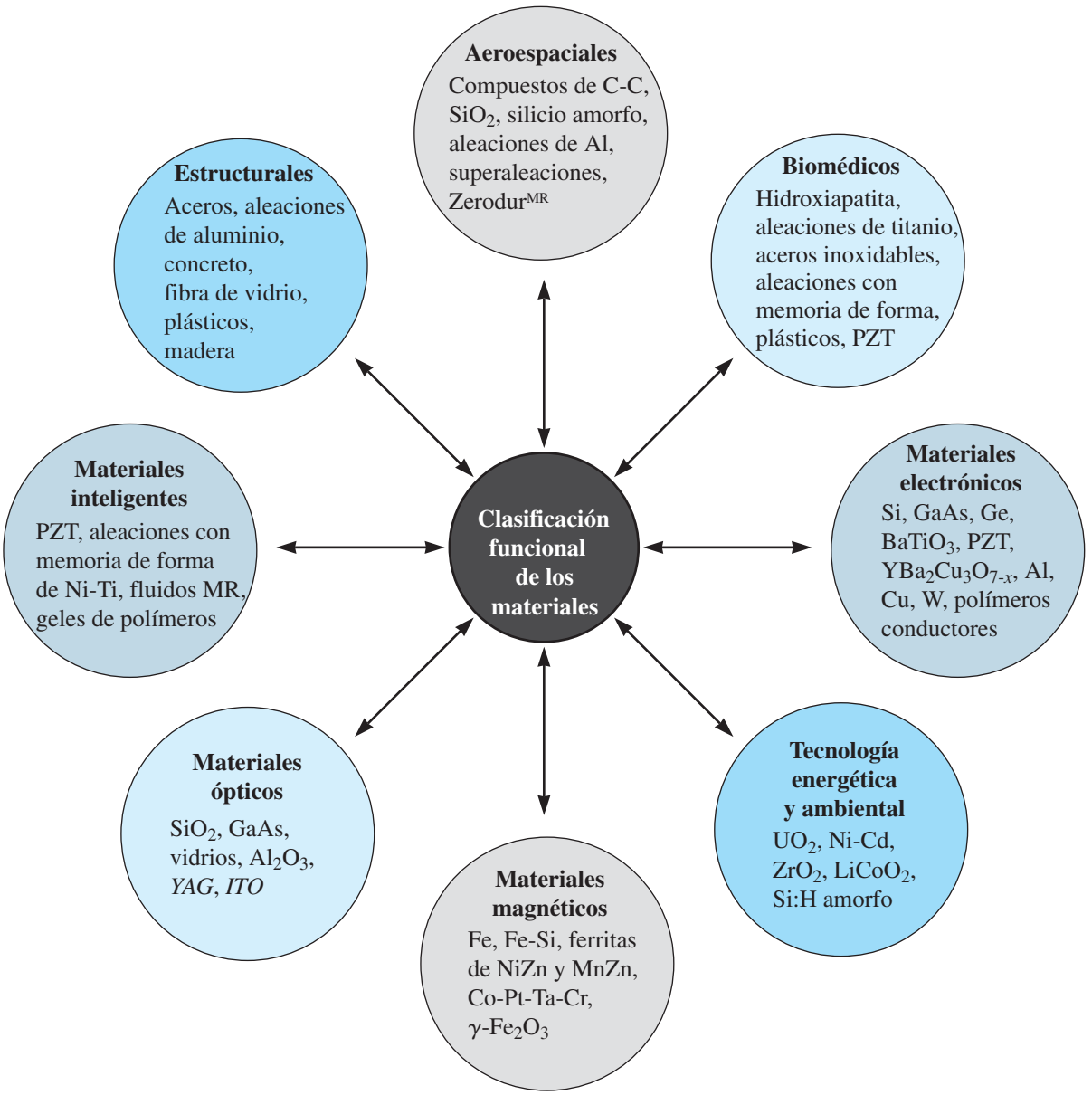


Figura 1-5 Clasificación funcional de los materiales. Observe que los metales, los plásticos y las cerámicas aparecen en categorías distintas. Se proporciona un número limitado de ejemplos en cada categoría.

Tecnología energética y tecnología ambiental

La industria nuclear emplea materiales, como el dióxido de uranio y el plutonio, como combustibles. Se recurre a otros muchos materiales, como vidrios y aceros inoxidables, para manejar materiales nucleares y desechos radiactivos. Las nuevas tecnologías relacionadas con las baterías y las celdas de combustible usan diversos materiales cerámicos, como la zirconia (ZrO_2) y los polímeros. La tecnología de las baterías ha adquirido una importancia significativa debido a la necesidad que tienen muchos dispositivos electrónicos de contar con energía portátil y más duradera. Las celdas de combustible también se usarán en automóviles eléctricos. Las industrias del aceite y petrolera usa ampliamente zeolitas, alúmina y otros materiales como sustratos catalizadores. Usan como catalizadores Pt, Pt/Rh y otros metales. Muchas tecnologías de membranas para la purificación de líquidos y gases usan cerámicas y plásticos. La energía solar se genera con base en el empleo de materiales, como silicio amorfo (a:Si:H).

Materiales magnéticos

Los discos duros de las computadoras contienen muchos materiales cerámicos, metálicos y poliméricos, dado que se fabrican utilizando aleaciones basadas

en cobalto-platino-tantalio-cromo (Co-Pt-Ta-Cr). También se emplean muchas ferritas magnéticas con la finalidad de fabricar inductores y componentes para transmitir comunicaciones inalámbricas. Los aceros a base de hierro y silicio se usan para fabricar núcleos de transformadores.

Materiales fotónicos u ópticos

El sílice se usa ampliamente para fabricar fibras ópticas. Se han instalado casi 10 millones de kilómetros de fibra óptica en el mundo. Los materiales ópticos se emplean para fabricar detectores semiconductores y láseres que forman parte de los sistemas de comunicación de fibra óptica y otras aplicaciones. De modo similar, la alúmina (Al_2O_3) y los granates de itrio aluminio (yttrium aluminum garnets, YAG) se usan para fabricar láseres. Se recurre al silicio amorfo para fabricar celdas solares y módulos fotovoltaicos. Los polímeros se usan para producir pantallas de cristal líquido (liquid crystal displays, LCD).

Materiales inteligentes

Un **material inteligente** puede sentir y responder a un estímulo externo, como un cambio de temperatura, la aplicación de un esfuerzo o un cambio en la humedad o en el ambiente químico. Por lo regular, un sistema basado en materiales inteligentes consiste en sensores y activadores que leen cambios e inician una acción. Un ejemplo de un material inteligente de manera pasiva es el titanato de zirconio de plomo (PZT) y las aleaciones con memoria de forma. Cuando se procesa de manera apropiada, el PZT puede someterse a un esfuerzo y se genera un voltaje. Este efecto se utiliza para fabricar dispositivos, como generadores de chispa para parrillas de gas y sensores que pueden detectar objetos bajo el agua, como peces y submarinos. Otros ejemplos de materiales inteligentes incluyen los fluidos magnetoreológicos o MR, que son pinturas magnéticas que responden a campos magnéticos. Estos materiales los usan General Motors, Ferrari y Audi para fabricar los sistemas de suspensión de los automóviles que producen. Otros ejemplos de materiales y sistemas inteligentes son los vidrios fotocrómicos y los espejos con oscurecimiento automático.

Materiales estructurales

Estos materiales están diseñados para soportar algún tipo de esfuerzo. Se emplean aceros, concreto y compuestos para construir edificios y puentes. Los aceros, los vidrios, los plásticos y los compuestos también se usan ampliamente para fabricar automóviles. Con frecuencia, en estas aplicaciones se necesita combinar resistencia, rigidez y tenacidad ante distintas condiciones de temperatura y carga.

1-4 Clasificación de los materiales con base en la estructura

Como ya se mencionó, el término “estructura” se refiere al arreglo de los átomos de un material; a la estructura a una escala microscópica se le conoce como “microestructura”. Es posible observar estos arreglos en diferentes escalas, que van de unas cuantas unidades angstrom a un milímetro. En el capítulo 3 se aprenderá que algunos materiales pueden ser **cristalinos** (los átomos del material están ordenados de manera periódica), o amorfos (el arreglo de los átomos del material no tienen un orden de largo alcance). A los materiales cristalinos que asumen forma de cristal se les denomina **monocristalinos**. Otros, que consisten en muchos cristales o **granos**, son conocidos como **policristalinos**. Las características de los cristales o granos (tamaño, forma, etc.) y las de las regiones entre ellos, conocidas como **límites de grano**, también afectan las propiedades de los materiales. Estos conceptos se explicarán con detalle en capítulos posteriores. Al inicio del capítulo se muestra una micrografía de un acero inoxidable.

1-5 Efectos ambientales y diversos

Con frecuencia, las relaciones estructura-propiedad de los materiales fabricados con componentes son influidas por el entorno al que el material está sometido durante su uso. Esto puede incluir la exposición a altas o bajas temperaturas, esfuerzos cíclicos, impacto súbito, corrosión u oxidación. Estos efectos deben considerarse en el diseño para asegurar que los componentes no fallen de forma inesperada.

Temperatura Los cambios de temperatura modifican drásticamente las propiedades de los materiales (figura 1-6). Los metales y las aleaciones que se han endurecido por medio de ciertos tratamientos térmicos o técnicas de formación pierden su resistencia cuando se calientan. Un recordatorio trágico de esta característica es el colapso de las vigas de acero que sostenían las torres del World Trade Center el 11 de septiembre de 2001. Aunque las torres soportaron el impacto inicial de las colisiones, sus estructuras de acero se debilitaron por las altas temperaturas provocadas por el fuego, lo que condujo, por último, al colapso.

Las altas temperaturas modifican la estructura de las cerámicas y provocan que los polímeros se fundan o se carbonicen. En el otro extremo, las temperaturas muy bajas pueden provocar que un metal o un polímero se quiebren o se resquebrajen, aun cuando las cargas aplicadas sean bajas. Este resquebrajamiento a baja temperatura fue un factor que provocó que el *Titanic* se fracturara y se hundiera. De manera similar, el accidente del *Challenger* en 1986 se debió en parte al resquebrajamiento de los anillos selladores de caucho. Las razones por las cuales algunos polímeros y materiales metálicos se vuelven quebradizos son diferentes. Estos conceptos se explicarán en capítulos posteriores.

Corrosión La mayoría de los metales y polímeros reaccionan con el oxígeno u otros gases, en particular a altas temperaturas. Los metales y las cerámicas pueden desintegrarse y los polímeros y las cerámicas sin óxido pueden oxidarse. Los materiales también son atacados por líquidos corrosivos, lo que provoca fallas prematuras. El ingeniero afronta el reto de seleccionar materiales o recubrimientos que eviten estas reacciones y permitan la operación en entornos extremos. En aplicaciones espaciales es posible tener que considerar el efecto de la radiación.

Fatiga En muchas aplicaciones, los componentes deben diseñarse de tal manera que la carga sobre el material no sea suficiente como para provocar una deformación permanente. Cuando se carga y descarga el material miles de veces, incluso cargas pequeñas, pueden comenzar a presentarse pequeñas fisuras, y el material falla a medida que estas fisuras crecen. A esto se le conoce como **falla por fatiga**. Cuando se diseñan componentes de soporte de carga, debe considerarse la posibilidad de fatiga.

Velocidad de deformación Como muchas personas, usted puede conocer el hecho de que la Silly Putty®, un plástico basado en silicona (no en silicio), puede estirarse de forma significativa si se jala de manera lenta (baja velocidad de deformación). Si lo jala rápido (alta velocidad de deformación) se parte en dos. Puede ocurrir un comportamiento similar con muchos materiales metálicos. Por lo tanto, en muchas aplicaciones, debe considerarse el nivel y la velocidad de deformación.

En muchos casos, los efectos de la temperatura, la fatiga, el esfuerzo y la corrosión pueden interrelacionarse y otros efectos externos pueden afectar el desempeño del material.

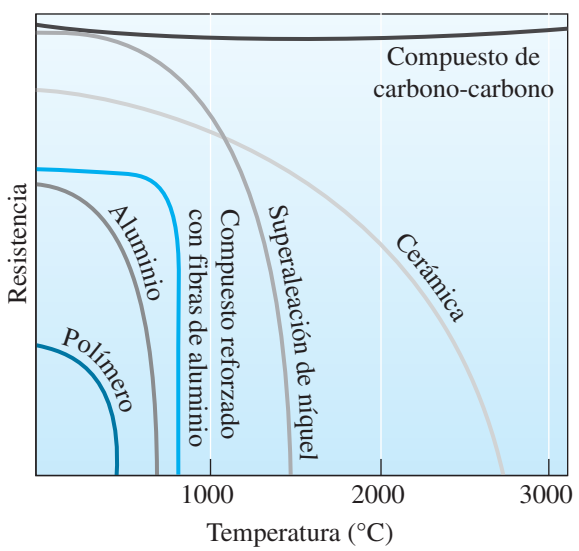


Figura 1-7 Por lo general, el aumento de la temperatura reduce la resistencia de un material. Los polímeros sólo son adecuados a bajas temperaturas. Algunos compuestos, como los de carbono-carbono, las aleaciones especiales y las cerámicas, tienen excelentes propiedades a altas temperaturas.

1-6 Diseño y selección de materiales

Cuando se diseña un material para una aplicación determinada, deben considerarse varios factores. El material debe adquirir las **propiedades físicas y mecánicas deseadas**, debe poder ser procesado o fabricado en la forma que se pretende y ofrecer una solución económica del problema de diseño. La satisfacción de estos requerimientos de una manera que proteja al ambiente —quizá mediante la promoción del reciclaje de los materiales— también es esencial. Si satisface estos requerimientos de diseño, el ingeniero puede tener que afrontar diversas disyuntivas para poder generar un producto útil, pero comercial.

Como ejemplo, por lo general el costo del material se calcula con base en el costo por libra. En el diseño y selección (tabla 1-2) se debe considerar la **densidad** del material, o su peso por unidad de volumen. Con base en su peso, el aluminio puede costar más que el acero, pero sólo tiene un tercio de la densidad de este. Aunque las partes fabricadas con aluminio pueden tener que engrosarse, la pieza de aluminio puede ser menos costosa que una elaborada con acero debido a la diferencia de peso.

En algunos casos, particularmente en aplicaciones aeroespaciales, el peso es crítico, dado que el peso adicional del vehículo aumenta el consumo de combustible. Mediante el uso de materiales que sean ligeros pero muy resistentes, pueden diseñarse vehículos aeroespaciales o automóviles para mejorar el rendimiento del combustible. Muchos vehículos aeroespaciales avanzados usan materiales compuestos en lugar de aluminio. Estos compuestos, como el carbono-epoxi, son más costosos que las aleaciones tradicionales de aluminio; sin embargo, el ahorro de combustible generado por la razón resistencia/peso más alta del compuesto (tabla 1-2) puede compensar el costo inicial mayor de la aeronave, como ocurre con el Boeing 787. Literalmente, existen miles de aplicaciones en las que se deben tener en cuenta aspectos similares. Por lo general, la selección de materiales involucra compensaciones entre muchas propiedades.

En este punto de la explicación, se espera que pueda apreciar que las propiedades de los materiales no sólo dependen de la composición, sino también de cómo se preparan (síntesis y procesamiento) y, más importante, de su estructura interna. Esto explica por qué no es una buena idea para un ingeniero consultar un manual y seleccionar un material para una aplicación dada. Los manuales pueden ser un buen punto de inicio. Un buen ingeniero debe considerar varios aspectos, entre ellos, los efectos de cómo se hizo el material, la composición exacta del material candidato para la aplicación que se pretende, cualquier procesamiento que pueda tener que realizarse para moldear el material o para fabricar un componente, la estructura del material después del procesamiento en un componente o dispositivo, el entorno en el que se usará el material y la razón costo/desempeño.

En secciones anteriores se ha explicado la necesidad de que conozca los principios de la ciencia e ingeniería de materiales. Si es usted un ingeniero y debe decidir qué materiales elegirá para fabricar un componente, el conocimiento de los principios de la ciencia e ingeniería de materiales lo capacitará para manejar los conceptos fundamentales, lo cual le permitirá tomar decisiones técnicas adecuadas cuando deba diseñar con materiales de ingeniería.

Tabla 1-2 Razones resistencia/peso de diversos materiales

Material	Resistencia (kg/m^2)	Densidad (g/cm^3)	Razón resistencia a peso (cm)
Polietileno	70×10^4	0.83	8.43×10^4
Aluminio puro	455×10^4	2.17	16.79×10^4
Al_2O_3	21×10^6	3.16	0.66×10^6
Epoxi	105×10^5	1.38	7.61×10^5
Acero de aleación tratada térmicamente	17×10^7	7.75	0.22×10^7
Aleación de aluminio tratada térmicamente	60×10^6	2.71	2.21×10^6
Compuesto de carbono-carbono	42×10^6	1.80	2.33×10^6
Aleación de titanio tratada de manera térmica	12×10^7	4.43	0.27×10^7
Compuesto de Kevlar-epoxi	46×10^6	1.47	3.13×10^6
Compuesto de carbono-epoxi	56×10^6	1.38	4.06×10^6

Resumen

- La ciencia e ingeniería de materiales (CIM) es un campo interdisciplinario que se enfoca en la invención de nuevos materiales y dispositivos y la mejora de materiales conocidos con el fin de obtener una comprensión más profunda de las relaciones microestructura-composición-síntesis-procesamiento.
- Los materiales de ingeniería son diseñados y fabricados con base en los principios de la CIM.
- Las propiedades de los materiales de ingeniería dependen de la composición, estructura, síntesis y procesamiento de estos. Un índice importante de desempeño de los materiales o dispositivos es su razón desempeño/costo.
- La estructura de un material se refiere al arreglo de los átomos o iones que constituyen el material.
- A nivel microscópico, a la estructura se le conoce como microestructura.
- En gran medida, muchas propiedades de los materiales dependen de la estructura, aún si la composición del material permanece igual. Esto explica por qué las relaciones estructura-propiedad o microestructura-propiedad son extremadamente importantes.
- Los materiales se clasifican en metales y aleaciones, cerámicas, vidrios y vidrios-cerámicos, compuestos, polímeros y semiconductores.
- Los metales y las aleaciones tienen buena resistencia, ductilidad y formabilidad. Los metales tienen buena conductividad eléctrica y térmica. Los metales y las aleaciones desempeñan una función indispensable en muchas aplicaciones para automóviles, construcciones, puentes, materiales aeroespaciales y similares.
- Las cerámicas son materiales inorgánicos cristalinos. Son resistentes, sirven como buenos aislantes eléctricos y térmicos, con frecuencia son resistentes al daño que provocan las altas temperaturas y los entornos corrosivos, pero son mecánicamente quebradizos. Las cerámicas modernas conforman los fundamentos de muchas tecnologías microelectrónicas y fotónicas.
- Los vidrios son sólidos inorgánicos amorfos que por lo general se derivan de un líquido fundido. Pueden templarse para incrementar su resistencia. Los vidrios-cerámicos se forman recociendo los vidrios para nuclear cristales pequeños que mejoran la resistencia a la fractura y al impacto térmico.
- Los polímeros tienen resistencias relativamente bajas; sin embargo, la razón resistencia/peso es muy favorable. No son adecuados para usarlos a altas temperaturas. Tienen muy buena resistencia a la corrosión y —como las cerámicas— proporcionan buen aislamiento eléctrico y térmico. Los polímeros pueden ser dúctiles o quebradizos según su estructura, temperatura y velocidad de deformación.
- Los semiconductores poseen propiedades eléctricas y ópticas únicas que los hacen esenciales para fabricar componentes en dispositivos electrónicos y de comunicación.
- Los compuestos se fabrican a partir de distintos tipos de materiales. Conforman combinaciones únicas de propiedades mecánicas y físicas que no pueden encontrarse en un solo material.
- La clasificación funcional de los materiales incluye los materiales aeroespaciales, biomédicos, electrónicos, de energía y ambientales, magnéticos, ópticos (fotónicos) y estructurales.
- Los materiales también pueden clasificarse como cristalinos o amorfos. Los materiales cristalinos pueden ser monocristalinos o policristalinos.
- Las propiedades de los materiales pueden depender de la temperatura, nivel y tipo de esfuerzo aplicado, velocidad de deformación, oxidación y corrosión y otros factores ambientales.
- La selección de un material que tenga las propiedades y el potencial necesarios para transformarse de manera económica y segura en un producto útil es un proceso complicado que requiere el conocimiento de las relaciones estructura-propiedad-procesamiento-composición.

Glosario

Aleación Material metálico que se obtiene por medio de la combinación química de distintos elementos (por ejemplo, el acero se fabrica a partir de hierro y carbono).

Cerámicas Grupo de materiales inorgánicos cristalinos que se caracterizan por una buena resistencia, en especial a la compresión y altas temperaturas de fusión.

Ciencia de materiales Campo de la ciencia que se enfoca en las relaciones básicas entre la microestructura, síntesis y procesamiento y propiedades de los materiales.

Ciencia e ingeniería de materiales (CIM) Campo interdisciplinario que estudia la invención de nuevos materiales y la mejora de materiales conocidos a fin de lograr una comprensión más profunda de las relaciones microestructura-composición-síntesis-procesamiento entre distintos materiales.

Composición Constitución química de un material.

Compuestos Grupo de materiales formados a partir de mezclas de metales, cerámicas o polímeros, de tal manera que se obtienen combinaciones de propiedades inusuales (por ejemplo, las fibras de vidrio).

Densidad Masa por unidad de volumen de un material, por lo regular expresada en unidades de g/cm^3.

Estructura Descripción de los arreglos de los átomos o iones en un material. La estructura de los materiales tiene una profunda influencia sobre muchas de sus propiedades, aún si la composición general no cambia.

Falla por fatiga Falla de un material debido a la carga y descarga repetidas.

Granos Cristales en un material policristalino.

Ingeniería de materiales Campo orientado a la ingeniería que se enfoca en cómo transformar materiales en un dispositivo o estructura útiles.

Límites de grano Regiones entre los granos de un material policristalino.

Material cristalino Material compuesto por uno o muchos cristales. En cada cristal, los átomos o iones muestran un arreglo periódico de largo alcance.

Material inteligente Material que puede sentir y responder a estímulos externos, como cambios de temperatura, aplicación de un esfuerzo o cambio del nivel de humedad o entorno químico.

Material policristalino Material compuesto por muchos cristales (opuesto a un material monocristalino que sólo contiene un cristal).

Metal Elemento que tiene enlazamiento metálico y por lo general buena ductilidad, resistencia y conductividad eléctrica.

Microestructura Estructura de un material a una escala de longitud microscópica.

Monocristal Material cristalino conformado por un solo cristal (no hay límites del grano).

Plásticos Polímeros que contienen otros aditivos.

Polimerización Proceso por medio del cual las moléculas orgánicas se unen en moléculas gigantes o polímeros.

Polímeros Grupo de materiales que por lo general se obtiene mediante la unión de moléculas orgánicas en cadenas o redes moleculares gigantes.

Procesamiento Distintas maneras de moldear materiales en componentes útiles o para modificar sus propiedades.

Propiedades físicas Características como el color, la elasticidad, la conductividad eléctrica o térmica, el magnetismo y el comportamiento óptico que por lo general no son influidos de manera significativa por las fuerzas que actúan sobre el material.

Propiedades mecánicas Propiedades de un material, como la resistencia, que describen qué tan bien este soporta las fuerzas aplicadas sobre él, las cuales incluyen las fuerzas de tensión y compresión, las fuerzas de impacto, las fuerzas cíclicas o de fatiga o las fuerzas a altas temperaturas.

Razón resistencia/peso Resistencia de un material dividida entre su densidad; los materiales con una razón resistencia/peso alta son resistentes pero ligeros.

Semiconductores Grupo de materiales que poseen una conductividad eléctrica entre la de los metales y las cerámicas comunes (por ejemplo, Si, GaAs).

Síntesis Proceso por medio del cual se elaboran materiales a partir de materiales naturales u otras sustancias químicas.

Termoestables Grupo especial de polímeros que, cuando se calientan, en lugar de fundirse se descomponen. Por lo general son bastante quebradizos, debido a que tienen una estructura de red tridimensional relativamente rígida (por ejemplo, el poliuretano).

Termoplásticos Grupo especial de polímeros en el que las cadenas moleculares están enredadas pero no interconectadas. Pueden fundirse con facilidad y adquirir formas útiles. Por lo general, estos polímeros tienen una estructura como la de una cadena (por ejemplo, el polietileno).

Tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales Diagrama tetraédrico que muestra cómo la razón desempeño/costo de los materiales depende de la composición, la microestructura, la síntesis y el procesamiento.

Vidrio Material amorfo derivado del estado fundido, por lo general, pero no siempre, basado en sílice.

Vidrios-cerámicos Clase especial de materiales que se obtienen por la formación de un vidrio al que después se trata térmicamente para formar cristales pequeños.

Problemas

Sección 1-1 ¿Qué es la ciencia e ingeniería de materiales?

1-1 Defina ciencia e ingeniería de materiales (CIM).

1-2 ¿Cuál es la importancia del tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales?

1-3 Defina los siguientes términos:
a) composición,
b) estructura,
c) síntesis,
d) procesamiento y
e) microestructura.

1-4 Explique la diferencia entre los términos ciencia de materiales e ingeniería de materiales.

Sección 1-2 Clasificación de los materiales

1-5 Los innumerables materiales que existen en el mundo se pueden clasificar, principalmente, en cuatro categorías básicas. ¿Cuáles son estas categorías? ¿Cómo se llaman los materiales que son fabricados con uno o más tipos de materiales diferentes en un solo componente? Proporcione un ejemplo.

1-6 ¿Cuáles son algunas de las propiedades materiales y mecánicas de los metales y las aleaciones?

1-7 ¿Qué es una cerámica? ¿Cuáles son las características que espera observar en una cerámica?

1-8 Compare los polímeros termoplásticos y termoestables con base en *a*) sus características mecánicas ante el calentamiento y *b*) sus posibles estructuras moleculares.

1-9 Dé tres ejemplos de materiales compuestos que puedan fabricarse.

1-10 En el caso de cada uno de las siguientes clases de materiales, proporcione dos ejemplos *específicos* del uso que haga de ellos en su vida cotidiana:
a) metales
b) cerámicas
c) polímeros y
d) semiconductores
Especifique en qué objeto se encuentra el material y explique por qué se emplea en cada aplicación. *Sugerencia*: Un ejemplo para el inciso sería *a*) el aluminio, que es un metal que se usa en la base de las ollas y sartenes para obtener una distribución uniforme del calor. Es un material ligero para los utensilios de cocina. Observe que en esta respuesta parcial del inciso *a*) se describe un metal específico para una aplicación específica.

1-11 Describa la propiedad que aportan los materiales en cada uno de los siguientes ejemplos y explique.
a) el acero de las vigas de los rascacielos.
b) una aleación de cromo-molibdeno-cobalto para implantes de cadera.
c) policarbonato para anteojos.
d) bronce para fundiciones artísticas.

1-12 Describa la propiedad que aportan los materiales en cada uno de los siguientes ejemplos y explique.
a) aluminio para cuerpos de avión.
b) poliuretano para alineadores de dientes (ortodoncia invisible).
c) acero para rodamiento de bolas en los cubos de las bicicletas.
d) tereflalato de poliuretano para botellas de agua.
e) vidrio para botellas de vino.

1-13 ¿Qué propiedades debe considerar un ingeniero cuando tiene que seleccionar los materiales para remplazar una rodilla por deterioro de la articulación con una prótesis artificial?

1-14 Escriba un párrafo acerca de las razones por las cuales el silicio monocristalino es, en la actualidad, el material que más se usa para aplicaciones microelectrónicas. Escriba un segundo párrafo acerca de las alternativas potenciales al silicio monocristalino para aplicaciones de celdas solares. Elabore una lista de las referencias

o sitios web que utilice. Debe presentar por lo menos tres referencias.

1-15 Los resortes helicoidales deben ser muy resistentes y rígidos. El Si_3N_4 es un material resistente y rígido. ¿Lo seleccionaría para un resorte? Explique su respuesta.

1-16 En ocasiones, los indicadores de temperatura se producen a partir de una tira de metal enrollada que se desenrolla una cantidad específica cuando aumenta la temperatura. ¿Cómo funciona; con qué tipo de material se debe fabricar el indicador y cuáles son las propiedades importantes que debe poseer el material que constituye el indicador?

Sección 1-3 Clasificación funcional de los materiales

Sección 1-4 Clasificación de los materiales con base en su estructura

Sección 1-5 Efectos ambientales y diversos

1-17 ¿Cuál es el propósito de la clasificación funcional de los materiales?

1-18 Explique las diferencias que existen entre los materiales cristalinos y los amorfos. Proporcione un ejemplo de cada uno en la vida cotidiana.

1-19 ¿Cómo determinaría si un material es cristalino o amorfo?

1-20 Enumere seis problemas de desempeño de los materiales que pueden provocar fallas de los componentes.

1-21 Con frecuencia, el acero es recubierto con una lámina delgada de zinc para que pueda usarse mejor en exteriores. ¿Qué características considera que el zinc aporta a este acero recubierto o galvanizado? ¿Qué precauciones deben considerarse en la fabricación de este producto? ¿Cómo se vería afectada la reciclabilidad del producto?

1-22 La relación entre la estructura y las propiedades de los materiales puede verse afectada por sus condiciones de servicio (condiciones ambientales). Señale dos desastres de ingeniería que tuvieron resultados trágicos y explique por qué ocurrieron.

Sección 1-6 Diseño y selección de materiales

1-23 ¿Cuál es la diferencia entre las propiedades físicas y las mecánicas? Mencione tres ejemplos de cada propiedad.

1-24 El tipo de motor a reacción que usan la mayoría de los grandes aviones comerciales se llama motor jet de turboventilador, ya que cuenta con una gran rueda en la parte delantera que impulsa el aire hacia atrás. La mayor parte de este aire pasa por el motor y aumenta significativamente su empuje y eficiencia. Algunos fabricantes usan materiales compuestos de fibra de carbono-epoxi en lugar de láminas de aluminio tradicionales.

a) ¿Cuáles propiedades de los materiales debería considerar un ingeniero cuando tiene que elegir el material para esta aplicación?

b) ¿Qué beneficios tiene la fibra de carbono-epoxi en comparación con las aleaciones de aluminio? ¿Qué limitaciones o desventajas potenciales tiene usar un compuesto de fibra de carbono- epoxi?

1-25 Usted es un ingeniero que trabaja para una fábrica de turbinas de gas en tierra, las cuales son similares a las de los motores de los aviones, pero se emplean en tierra para generar electricidad y aplicaciones de tuberías de compresión de gas. Suponga que desea aplicar un recubrimiento de barrera térmica a base de cerámica a los álabes de la turbina, en la turbina de primera etapa, para aumentar la temperatura de funcionamiento y la eficiencia del motor.

a) ¿Qué dificultades podrían encontrar los ingenieros si diseñan un revestimiento cerámico que se aplicará a una hoja de superaleación de metal?

b) ¿Cuáles propiedades debe considerar cuando tiene que elegir una cerámica para recubrimiento? Sea tan específico como le sea posible.

1-26 Nos gustaría fabricar un techo transparente para una aeronave. Si tuviéramos que usar una cubierta tradicional de vidrio, las rocas o las aves podrían romperla. Diseñe un material que minimice el daño o, al menos, impida que el techo se rompa en pedazos.

1-27 Se tiene que diseñar un avión que puede volar con energía humana sin detenerse durante 30 km. ¿Qué tipos de propiedades materiales recomendaría? ¿Qué materiales podrían ser adecuados?

1-28 Desea poner en órbita un microsatélite de 3 pies de diámetro. El aparato contendrá equipo electrónico delicado que enviará y recibirá señales de radio desde la Tierra. Diseñe la coraza externa que contendrá el equipo electrónico. ¿Qué propiedades requerirá y qué tipo de materiales debería considerar?

1-29 ¿Qué propiedades debe poseer la cabeza de un martillo de carpintero? ¿Cómo fabricaría una cabeza de martillo?

1-30 Desea seleccionar un material para los contactos eléctricos de un dispositivo de conmutación eléctrica que se abre y cierra con frecuencia y a la fuerza. ¿Qué propiedades debe poseer el material del contacto? ¿Qué tipo de material podría recomendar? ¿Sería el Al_2O_3 una buena elección? Explique su respuesta.

1-31 El aluminio tiene una densidad de 2.7 g/cm^3. Suponga que desea producir un material compuesto que incluya aluminio con una densidad de 1.5 g/cm^3. Diseñe un material que tenga esta densidad. ¿Sería una posibilidad introducir en el aluminio gránulos de polietileno con una densidad de 0.95 g/cm^3? Explique su respuesta.

1-32 Desearía ser capaz de identificar distintos materiales sin recurrir al análisis químico o a procedimientos probatorios extensos. Describa algunas técnicas de prueba y clasificación posibles que podría utilizar con base en las propiedades físicas de los materiales.

1-33 Desea poder separar físicamente distintos materiales en una planta de reciclaje de desechos. Describa algunos métodos posibles que podría utilizar para diferenciar materiales como polímeros, aleaciones de aluminio y aceros.

1-34 Podrían fabricarse algunos pistones para motores de automóviles con un material compuesto que contenga partículas pequeñas y duras de carburo de silicio en una matriz de aleación de aluminio. Explique los beneficios que pueden proporcionar a la parte en general cada uno de los materiales del compuesto. ¿Qué problemas podrían ocasionar las distintas propiedades de los dos materiales durante el proceso de manufactura de la parte?

1-35 Investigue los orígenes y aplicaciones de un material que ha sido inventado o descubierto después que usted nació o el desarrollo de un producto o tecnología que haya sido inventado después de su nacimiento, gracias al uso de un material nuevo. Escriba un párrafo acerca de este material o producto. Elabore una lista de las referencias o sitios web que utilice. Debe señalar, por lo menos, tres referencias.

Problemas Knovel^{MR}

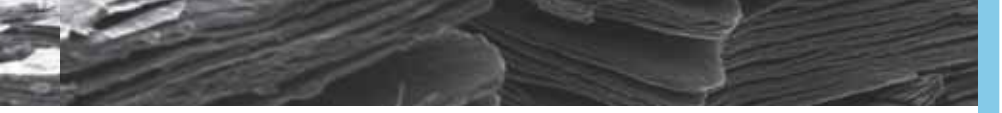
Todos los problemas incluidos en la sección final de cada capítulo requieren el uso del sitio web de Knovel (http://www.knovel.com/web/portal/browse). Estos tres problemas son diseñados para servir de introducción a Knovel, su sitio web y las herramientas interactivas disponibles en él. Para conocer una introducción detallada que describa el uso de Knovel, visite el sitio web del libro en http://www.cengage. com/engineering/askeland y vaya al sitio del Student Companion.

K1-1
- Convierta 7,750 kg/m^3 a g/l utilizando el convertidor de unidades.
- Con ayuda de la tabla periódica, determine el peso atómico del magnesio.
- ¿Cuál es el nombre de la sección 4 de Perry's Chemical Engineers' Handbook (séptima edición)?
- Encuentre el título de un libro que abarque los fundamentos de la química además de contener tablas interactivas de información química.

K1-2
- Por medio de la opción de búsqueda básica en Knovel, encuentre toda la información posible, física y termodinámica, asociada con el nitrato de amonio. ¿Qué aplicaciones tiene esta sustancia química?
- Mediante una búsqueda básica, encuentre la fórmula para determinar el volumen de una esfera y un cilindro.
- Busque información que le permita elaborar una lista de cinco sustancias químicas con un punto de ebullición de entre 300 y 400 K.

K1-3
- Utilizando el graficador de ecuaciones, determine la entalpía de vaporización del ácido acético puro a 360 K.
- ¿Cuál es la presión (en atm) del aire a una temperatura de 200 °F y un contenido de agua de 10^{-2} kg de agua/kg de aire?
- Encuentre tres grados de polímeros con un punto de fusión mayor de 325°C.

El diamante y el grafito están conformados por carbono puro, pero sus propiedades materiales varían de forma considerable. Estas particularidades surgen de las diferencias entre los arreglos de los átomos en los sólidos y de los diferentes enlazamientos entre los átomos. El enlace covalente en el diamante genera altas resistencia y rigidez, una conductividad térmica excelente y una conductividad eléctrica deficiente. (*Özer Öner/Shutterstock.com*) Los átomos del grafito están arreglados en hojas. Dentro de estas, el enlace entre los átomos es covalente, pero entre ellas, los enlaces son menos fuertes. Por ello, el grafito puede cortarse con facilidad en hojas, como ocurre cuando se escribe con un lápiz. (*Ronald van der Beek/Shutterstock.com*) La conductividad térmica del grafito es mucho menor que la del diamante y su conductividad eléctrica es mucho mayor.



CAPÍTULO

2

Estructura atómica

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Qué es la nanotecnología?*
- *¿Por qué el carbono, en forma de diamante, es uno de los materiales más duros conocidos, pero como grafito es muy blando y puede usarse como lubricante sólido?*
- *¿Cómo la sílice, que constituye la sustancia química principal de la arena de playa, se usa en forma ultrapura para fabricar fibras ópticas?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Definir los cuatro números cuánticos de los electrones y explicar el significado de cada uno.
- Explicar la disposición de los elementos en una tabla periódica.
- Indicar la estructura electrónica de los elementos.
- Explicar el papel de la electronegatividad en el enlace.
- Definir cuatro mecanismos diferentes de los enlaces de los materiales.
- Entender cómo influyen las interacciones entre los átomos o iones en las propiedades de los materiales.
- Reconocer que aunque los alótropos están compuestos por un mismo elemento, pueden mostrar propiedades materiales diferentes en función de su estructura (por ejemplo, los alótropos de carbono).

Los científicos e ingenieros en materiales han desarrollado un conjunto de instrumentos para caracterizar la **estructura** de los materiales según varias escalas de longitud, a la cual es posible examinar y describir en cinco niveles distintos:

1. estructura atómica
2. arreglos atómicos de corto y largo alcance
3. nanoestructura
4. microestructura
5. macroestructura

Las características de la estructura en cada uno de estos niveles pueden tener influencias distintivas y profundas sobre las propiedades y el comportamiento de un material.

El objetivo de este capítulo es estudiar la **estructura atómica** (el núcleo que consiste en protones y neutrones y los electrones que rodean el núcleo) a fin de tener una base para comprender cómo afecta la estructura atómica las propiedades, el comportamiento y las aplicaciones resultantes de los materiales de ingeniería. Se estudiará que la estructura de los átomos afecta los tipos de enlaces que mantienen unidos los materiales entre sí. A su vez, estos distintos tipos de enlaces afectan la idoneidad de los materiales para las aplicaciones de ingeniería en el mundo real. Por lo general, el diámetro de los átomos se mide utilizando la unidad angstrom (Å o 10^{-10} m).

También es importante comprender las causas por las cuales la estructura atómica y el enlace conducen a distintos arreglos atómicos o iónicos de los materiales. El análisis minucioso del arreglo atómico permite distinguir entre materiales **amorfos** (aquellos que carecen de un ordenamiento de largo alcance de átomos o iones) o **cristalinos** (aquellos que exhiben arreglos periódicos de átomos o iones). Los materiales amorfos sólo tienen **arreglos atómicos de corto alcance,** mientras que los cristalinos tienen arreglos de corto y **largo alcance**. En los arreglos atómicos de corto alcance, los átomos o iones sólo muestran un orden particular en distancias relativamente cortas (de 1 a 10 Å). En el caso de los materiales cristalinos, el **orden atómico de largo alcance** asume la forma de átomos o iones arreglados en un patrón tridimensional que se repite sobre distancias mucho mayores (de ~10 nm a 1 cm).

La ciencia e ingeniería de materiales está a la vanguardia de la **nanociencia** y la **nanotecnología**. La nanociencia es el estudio de los materiales a una escala de longitud nanométrica, mientras que la nanotecnología implica la manipulación y el desarrollo de dispositivos a esa misma escala de longitud. La **nanoestructura** es la estructura de un material a una **escala de longitud** de 1 a 100 nm. El interés por el tema del control de la nanoestructura se ha incrementado de manera importante debido a las aplicaciones de ingeniería con materiales avanzados.

La **microestructura** es la estructura de los materiales a una **escala de longitud** de 100 a 100,000 nm o 0.1 a 100 micrómetros (con frecuencia escritos como μm y pronunciados como "microns"). Por lo general, la microestructura se refiere a características como el tamaño del grano de un material cristalino y otras relacionadas con los defectos en los materiales. (Un *grano* es un monocristal de un material compuesto por muchos cristales.)

La **macroestructura** es la estructura de un material a nivel macroscópico donde la escala de longitud es >100 μm. Las características que determinan la macroestructura incluyen la porosidad, los recubrimientos de la superficie y las microfisuras internas y externas.

El capítulo concluye con el estudio de algunos de los **alótropos** del carbono. Se verá que, aunque el diamante y el grafito están hechos de carbono puro, tienen propiedades materiales distintas. La clave para comprender estas diferencias es comprender cómo se arreglan los átomos en cada alótropo.

2-1 Estructura de los materiales: relevancia tecnológica

En el mundo de hoy, la tecnología de información (TI), la biotecnología, la tecnología energética, la tecnología ambiental y otras áreas requieren dispositivos más pequeños, ligeros, rápidos, portátiles, eficientes, confiables, duraderos y económicos. Se desean baterías que sean más pequeñas, ligeras y de mayor duración. Se requieren automóviles relativamente accesibles, ligeros, seguros, con alto rendimiento de combustible y "llenos" de varias características avanzadas, que van desde sistemas de posicionamiento global (GPS) hasta sofisticados sensores para la activación de bolsas de aire.

Algunas de estas necesidades han generado un interés considerable en la nanotecnología y en los **sistemas microelectromecánicos** (SMEM). Como ejemplo real de la tecnología de los SMEM, considere un sensor de un acelerómetro pequeño que se obtiene por medio del micromaquinado del silicio (Si). Este sensor se usa para medir la aceleración de los automóviles. La información es procesada por una computadora central y después se utiliza para controlar la activación de las bolsas de aire. Las propiedades y el comportamiento de los materiales a estos niveles "micro" pueden variar

en gran medida cuando se comparan con aquellos en su estado "macro" o voluminoso. Como resultado, comprender la nanoestructura y la microestructura son áreas que han recibido una atención considerable.

Las aplicaciones que se muestran en la tabla 2-1 y en las figuras que le acompañan (figuras 2-1 a 2-6) ilustran cuán importante son para el comportamiento de los materiales los distintos niveles de la estructura. Las aplicaciones que se ilustran están divididas por medio de sus niveles de estructura y de sus escalas de longitud (la longitud característica aproximada que es importante para una aplicación determinada).

Ahora se enfocará la atención en los detalles que conciernen a la estructura de los átomos, el enlace entre estos y cómo forman la base de las propiedades de los materiales. La estructura atómica influye en la manera en que se enlazan los átomos entre sí. Comprender este tema ayuda a categorizar a los materiales como metales, semiconductores, cerámicas o polímeros. También permite formular algunas conclusiones preliminares que conciernen a las propiedades mecánicas y a los comportamientos físicos de estas cuatro clases de materiales.

Tabla 2-1 Niveles de estructura

Nivel de estructura	Ejemplo de tecnología
Estructura atómica ($\sim 10^{-10}$ m o 1 Å)	El diamante está basado en enlaces covalentes de carbono-carbono. Se espera que los materiales con este tipo de enlazamiento sean relativamente duros. Se utilizan películas delgadas de diamantes para proporcionar un filo resistente al desgaste en las herramientas de corte.
Arreglos atómicos: orden de largo alcance (OLA) (~10 nm a cm)	Cuando los iones del titanato de zirconio de plomo [$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$] o PZT se acomodan de tal manera que exhiben estructuras cristalinas tetragonales y/o romboédricas (vea el capítulo 3), el material es piezoeléctrico (es decir, desarrolla un voltaje cuando se somete a una presión o a un esfuerzo). Las cerámicas PZT se utilizan ampliamente en varias aplicaciones, entre ellas, encendedores de gas, generación de ultrasonidos y control de vibración.

Figura 2-1 Herramientas de corte recubiertas con diamante. (*Cortesía de NCD Technologies*)

Figura 2-2 Encendedores de gas piezoeléctricos basados en PZT. Cuando se somete a un esfuerzo el material piezoeléctrico (aplicando una presión), se desarrolla un voltaje y se crea una chispa entre los electrodos. (*Cortesía de Morgan Electro Ceramics, Ltd. RU*)

Tabla 2-1 Niveles de estructura *(Continuación)*

Nivel de estructura	Ejemplo de tecnología
Arreglos atómicos: orden de corto alcance (OCA) (1 a 10Å)	Los iones en vidrios basados en sílice (SiO_2) sólo exhiben un orden de corto alcance en el que los iones Si^{4+} y O^{2-} están acomodados de una manera particular (cada Si^{4+} enlazado con 4 iones O^{2-} en una coordinación tetraédrica, es decir, cada ion es compartido por dos tetraedros). Sin embargo, este orden no se mantiene en distancias largas, por lo que le otorga carácter de amorfos a estos tipos de vidrios. Los vidrios amorfos construidos en sílice y otros óxidos forman la base de toda la industria de comunicaciones por fibra óptica.
Nanoestructura $\sim 10^{-9}$ a 10^{-7}m, 1 a 100 nm)	Las partículas de nanotamaño (~5-10 nm) de óxido de hierro se utilizan en ferrofluidos o imanes líquidos. Una aplicación de estos imanes líquidos es como medio de refrigeración (transferencia de calor) para altavoces.
Microestructura ($\sim > 10^{-7}$ a 10^{-4} m, 0.1 a 100 μm)	En gran medida, la resistencia mecánica de muchos metales y aleaciones depende del tamaño del grano. Los granos y los límites de los granos en esta micrografía acompañante del acero son parte de las características microestructurales de este material cristalino. En general, a temperatura ambiente un tamaño de grano más fino genera una resistencia mayor. Muchas propiedades importantes de los materiales son sensibles a la microestructura.

Figura 2-3 Fibras ópticas basadas en una forma de la sílice que es amorfa. (*Nick Rowel Photodisc Green/GettyImages*)

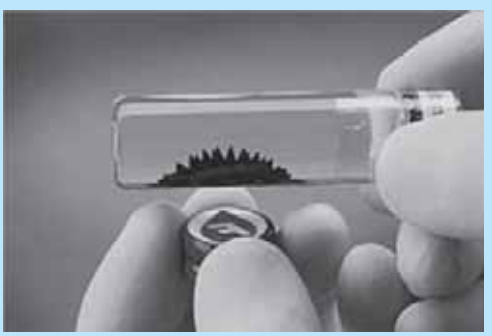


Figura 2-4 Ferrofluido. (*Cortesía de Ferro Tec USA Corporation*)

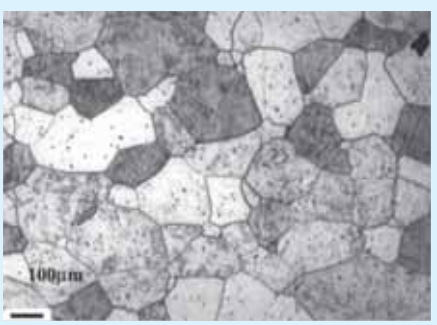


Figura 2-5 Micrografía del acero inoxidable que muestra los granos y los límites de los granos. (*Micrografía cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García*)

Tabla 2-1 Niveles de estructura *(Continuación)*

Nivel de estructura	Ejemplo de tecnología
Macroestructura ($\sim > 10^{-4}$ m, $\sim >$10,000 nm o 100 μm)	Los recubrimientos relativamente gruesos, como las pinturas de los automóviles y otras aplicaciones, no sólo se utilizan por estética, sino que también proporcionan resistencia a la corrosión.

Figura 2-6 Diversos recubrimientos orgánicos e inorgánicos protegen contra la corrosión a los automóviles y proporcionan una apariencia agradable. (*George Dolgikhl/ Shutterstock.com*)

2-2 Estructura del átomo

Los conceptos que se mencionan a continuación se cubren en los cursos introductorios comunes de química. En este libro sólo se proporciona un repaso breve. Un átomo está compuesto por un núcleo rodeado por electrones. El núcleo contiene neutrones y protones con carga positiva y tiene una carga neta positiva. Los electrones con carga negativa se mantienen alrededor del núcleo por medio de la atracción electrostática. La carga eléctrica q que tiene cada electrón y protón es de 1.60×10^{-19} coulombs (C).

El **número atómico** de un elemento es igual al número de protones que hay en cada átomo. Por lo tanto, un átomo de hierro, que contiene 26 protones, tiene un número atómico de 26. El átomo como un todo es eléctricamente neutro debido a que el número de protones y electrones son iguales.

La mayor parte de la masa del átomo está contenida dentro del núcleo. La masa de cada protón y neutrón es de 1.67×10^{-24} g, pero la masa de cada electrón es de sólo 9.11×10^{-28} g. La **unidad de masa atómica**, o uma, es una unidad alterna de la masa atómica, la cual es 1/12 la masa del carbono 12 (es decir, el átomo de carbono con 12 **nucleones**, seis protones y seis neutrones). La **masa atómica** M, que es igual a la masa total del número promedio de protones y neutrones del átomo en unidades de masa atómica, también es la masa en gramos de la constante de Avogadro N_A de átomos. La cantidad $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ átomos/mol es el número de átomos o moléculas en un mol. Por lo tanto, la masa atómica tiene unidades de g/mol. Como ejemplo, un mol de hierro tiene 6.022×10^{23} átomos y una masa de 55.847 g. Los cálculos que incluyen la masa atómica de un material y la constante de Avogadro son útiles para comprender más acerca de la estructura de un material. El ejemplo 2-1 ilustra cómo calcular el número de átomos de la plata, un metal y un buen conductor eléctrico.

Ejemplo 2-1 *Cálculo del número de átomos en la plata*

Calcule el número de átomos en 100 g de plata

SOLUCIÓN

El número de átomos puede calcularse a partir de la masa atómica y la constante de Avogadro. Según el apéndice A, la masa atómica, o peso, de la plata es de 107.868 g/mol. El número de átomos es

$$\text{Número de átomos de Ag} = \frac{(100 \text{ g})(6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}{107.868 \text{ g/mol}}$$

$$= 5.58 \times 10^{23}$$

2-3 Estructura electrónica del átomo

Los electrones ocupan niveles discretos de energía dentro del átomo. Cada electrón posee una energía específica, con no más de dos electrones en cada átomo que tienen la misma energía. Dado que cada elemento posee un conjunto distinto de estos niveles de energía, las diferencias entre ellos también son únicas. En cada elemento, los niveles de energía y las diferencias entre ellos se conocen con gran precisión, lo que forma la base de varios tipos de **espectroscopia**. Con ayuda de un método espectroscópico, puede determinarse la identidad de los elementos en una muestra.

Números cuánticos

El nivel de energía al que pertenece cada electrón es determinado por cuatro **números cuánticos**: el número cuántico principal n, el número cuántico acimutal o secundario l, el número cuántico magnético m_l y el número cuántico del espín m_s.

El número cuántico principal refleja el agrupamiento de los electrones en conjuntos de niveles de energía conocidos como capas. Los números cuánticos acimutales describen los niveles de energía dentro de cada capa cuántica y reflejan un agrupamiento posterior de los niveles de energía similares, por lo general llamados orbitales. El número cuántico magnético especifica los orbitales asociados con un número cuántico acimutal particular dentro de cada capa. Por último, al **número cuántico del espín** (m_s) se le asignan valores de $+1/2$ y $-1/2$, lo cual refleja los dos valores posibles del "espín" de un electrón.

Con base en el **principio de exclusión de Pauli**, dentro de cada átomo, dos electrones no pueden tener los mismos cuatro números cuánticos y, por lo tanto, cada uno de ellos se designa por un conjunto único de cuatro números cuánticos. El número de niveles posibles de energía es determinado por los primeros tres números cuánticos.

1. Al número cuántico principal n se le asignan valores enteros 1, 2, 3, 4, 5, . . . que se refieren a la capa cuántica a la que pertenece el electrón. Una **capa cuántica** es un *conjunto* de niveles de energía fijos a los que pertenecen los electrones.

   A las capas cuánticas también se les asigna una letra: a la capa de $n = 1$ se le designa K, a la de $n = 2$ es L, a la de $n = 3$ es M y así sucesivamente. Estas designaciones fueron transferidas de la nomenclatura que se utiliza en la espectroscopia óptica, un conjunto de técnicas anteriores a la comprensión de los niveles electrónicos cuantizados.

2. El *número* de niveles de energía de cada capa *cuántica* es determinado por el n**úmero cuántico acimutal** l y por el número cuántico magnético m_l. Los números cuánticos acimutales se designan como $l = 0, 1, 2, \ldots, n - 1$. Por ejemplo, cuando $n = 2$, hay dos números cuánticos acimutales, $l = 0$ y $l = 1$. Cuando $n = 3$ hay tres números cuánticos acimutales, $l = 0$, $l = 1$ y $l = 2$. Los números cuánticos acimutales se designan por medio de letras minúsculas; por ejemplo, se habla de los orbitales *d*:

   $$s \text{ para } l = 0 \quad d \text{ para } \ell = 2$$
   $$p \text{ para } l = 1 \quad f \text{ para } \ell = 3$$

3. El número de valores del número cuántico magnético m_l representa el número de niveles de energía, u orbitales, de cada número cuántico acimutal. El número total de números cuánticos magnéticos de cada l es $2l + 1$. Los valores de m_l están dados por los números enteros entre $-l$ y $+l$. Por ejemplo, si $l = 2$, hay $2(2) + 1 = 5$ números cuánticos magnéticos con valores $-2, -1, 0, +1$ y $+2$. La combinación de l y m_l especifica un orbital particular en una capa.
4. No más de dos electrones con espines electrónicos opuestos ($m_s = +1/2$ y $-1/2$) pueden encontrarse en cada orbital.

Si se consideran con cuidado los valores numéricos posibles de n, l y m_l, se puede determinar el intervalo de números cuánticos *posibles*. Por ejemplo, en la capa K (esto es, $n = 1$), sólo hay un orbital *s* (ya que el único valor permitido de l es 0 y m_l es 0). Como resultado, una capa K no puede contener más de dos electrones. Otro ejemplo: considere una capa M. En este caso $n = 3$, por lo que l toma valores de 0, 1 y 2 (están presentes los orbitales *s*, *p* y *d*). Los valores de m_l reflejan que hay un solo orbital *s* ($m_l = 0$, un solo valor), tres orbitales *p* ($m_l = -1, 0, +1$ o tres valores) y cinco orbitales *d* ($m_l = -2, -1, 0, +1, +2$ o cinco valores discretos).

La notación abreviada que se utiliza con frecuencia para indicar la estructura electrónica de un átomo combina el valor numérico del número cuántico principal, la notación de letra minúscula del número cuántico acimutal y un superíndice que muestra el número de electrones en cada orbital. La notación abreviada del neón, que tiene un número atómico de 10 es:

$$1s^2 2s^2 2p^6$$

Desviaciones de las estructuras electrónicas esperadas

Los niveles de energía de las capas cuánticas no se llenan en un orden numérico estricto. El **principio de Aufbau** es un mecanismo gráfico que predice las desviaciones del ordenamiento esperado de los niveles de energía. En la figura 2-7 se muestra el principio de Aufbau. Para utilizar este principio, escriba las combinaciones posibles del número cuántico principal y el número cuántico acimutal de cada capa cuántica. Las combinaciones de cada capa cuántica deben escribirse en una sola línea. Cuando el número cuántico principal aumenta uno, el número de combinaciones cuánticas dentro de cada capa aumenta uno (es decir, cada fila es una entrada mayor que la fila anterior). Dibuje flechas en diagonal a través de las filas desde la derecha superior a la izquierda inferior como se muestra en la figura 2-7. Siguiendo las flechas, se predice el orden en el que se llenan los niveles de energía de cada nivel cuántico.

Por ejemplo, con base en el principio de Aufbau, la estructura electrónica del hierro, número atómico 26, es

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^6$$

Por convención, los números cuánticos principales se ordenan de menor a mayor cuando se escribe la estructura electrónica. Por lo tanto, la estructura electrónica del hierro se escribe

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 \quad \boxed{3d^6 4s^2}$$

El nivel $3d$ sin llenar (hay cinco orbitales d, por lo que de manera abreviada son posibles d^1, d^2, . . . , d^{10}) provoca el comportamiento magnético del hierro.

Observe que no todos los elementos siguen el principio de Aufbau. Unos cuantos, como el cobre, son las excepciones. Con base en el principio de Aufbau, el cobre debe tener la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^9 4s^2$, pero en realidad es

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} \quad \boxed{4s^1}$$

En general, los electrones ocupan cada orbital de un nivel de energía dado de manera sencilla antes que los orbitales que están doblemente ocupados. Por ejemplo, el nitrógeno tiene la estructura electrónica

$$1s^2 \quad \boxed{2s^2 2p^3}$$

Cada uno de los tres orbitales p en la capa L contiene un electrón en vez de un orbital que contiene dos electrones, uno con un electrón y uno con cero electrones.

Valencia

La **valencia** de un átomo es el número de electrones que contiene un átomo que participan en el enlazamiento o en las reacciones químicas. Por lo general, la valencia es el número

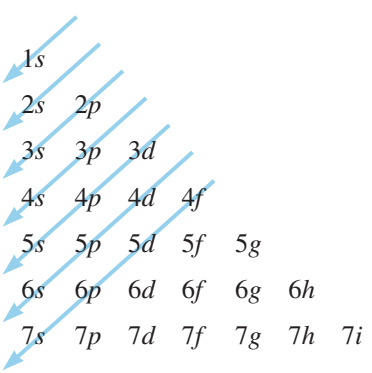


Figura 2-7 Principio de Aufbau. Siguiendo las flechas, se predice el orden en el que se llenan los niveles de energía de cada nivel cuántico: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, etc. Observe que las designaciones con letra de $l = 4$, 5, 6 son g, h e i.

de electrones en los niveles de energía externos *s* y *p*. La valencia de un átomo está relacionada con la capacidad del átomo para entrar en combinación química con otros elementos. Ejemplos de valencia son

$$\text{Mg: } 1s^2 2s^2 2p^6 \boxed{3s^2} \qquad \text{valencia} = 2$$
$$\text{Al: } 1s^2 2s^2 2p^6 \boxed{3s^2 3p^1} \qquad \text{valencia} = 3$$
$$\text{Si: } 1s^2 2s^2 2p^6 \boxed{3s^2 3p^2} \qquad \text{valencia} = 4$$

La valencia también depende del entorno inmediato que rodea al átomo o de los átomos vecinos disponibles para el enlazamiento. El fósforo tiene una valencia de cinco cuando se combina con el oxígeno, pero su valencia sólo es de tres, los electrones en el nivel 3*p*, cuando reacciona con hidrógeno. ¡El manganeso puede tener una valencia de 2, 3, 4, 6 o 7!

Estabilidad atómica y electronegatividad

Si un átomo tiene una valencia de cero, el elemento es inerte (no reactivo). Un ejemplo es el argón (Ar), el cual tiene la estructura electrónica:

$$1s^2 2s^2 2p^6 \boxed{3s^2 3p^6}$$

Otros átomos se comportan como si sus niveles externos *s* y *p* estuvieran por completo llenos, con ocho electrones, o completamente vacíos. El aluminio tiene tres electrones en sus niveles externos *s* y *p*. Un átomo de aluminio puede ceder con facilidad sus tres electrones externos para vaciar los niveles 3*s* y 3*p*. El enlazamiento atómico y el comportamiento químico del aluminio son determinados por la forma en que interaccionan estos tres electrones con los átomos circundantes.

Por otro lado, el cloro contiene siete electrones en los niveles externos 3*s* y 3*p*. La reactividad del cloro es provocada por su deseo de llenar su nivel de energía externo aceptando un electrón.

La **electronegatividad** describe la tendencia de un átomo a ganar un electrón. Los átomos con niveles de energía externos casi llenos por completo, como el cloro, son altamente electronegativos y aceptan electrones con facilidad. Sin embargo, los átomos con niveles externos casi vacíos, como el sodio, ceden electrones con facilidad y tienen escasa electronegatividad. Los elementos con número atómico alto también tienen electronegatividad baja, debido a que los electrones externos están a una distancia mayor del núcleo positivo, por lo que no son tan atraídos fuertemente por el átomo. En la figura 2-8 se muestran las electronegatividades de algunos elementos. Los elementos con una electronegatividad baja (es decir <2.0) en ocasiones se describen como **electropositivos**.

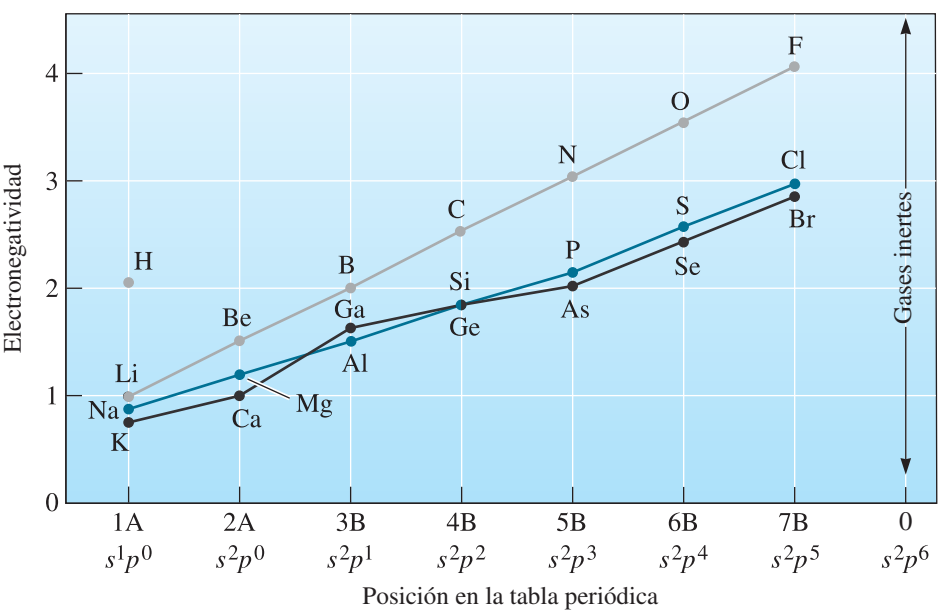


Figura 2-8 Electronegatividades de algunos elementos en relación con la posición de los elementos en la tabla periódica.

2-4 Tabla periódica

La tabla periódica contiene información valiosa acerca de elementos específicos y también puede ayudar a identificar las tendencias en tamaño atómico, punto de fusión, reactividad química y otras propiedades. La familiar tabla periódica (figura 2-9) se construye con base en la estructura electrónica de los elementos. No todos los elementos incluidos en ella son de ocurrencia natural. Por su parte, los periodos (filas) corresponden a las capas cuánticas, o números cuánticos principales. Los grupos (columnas) por lo regular se refieren al número de electrones en los niveles de energía *s* y *p* más externos y corresponden a la valencia más común. En ingeniería, se trata principalmente con:

a) Polímeros (plásticos) (basados principalmente en carbono, el cual aparece en el grupo 4B);

b) Cerámicas (por lo general basadas en combinaciones de varios elementos que aparecen en los grupos 1 al 5B y en elementos como oxígeno, carbono y nitrógeno), y

c) Materiales metálicos (por lo regular basados en elementos de los grupos 1, 2 y en los elementos metálicos de transición).

En el grupo 4B aparecen muchos semiconductores importantes para la tecnología (por ejemplo, el silicio, el diamante y el germanio). Los semiconductores también pueden ser combinaciones de elementos de los grupos 2B y 6B [por ejemplo, el seleniuro de cadmio (CdSe), basados en cadmio del grupo 2 y en selenio del grupo 6]. Se les conoce como **semiconductores II-VI** (dos-seis). De manera similar, el arseniuro de galio (GaAs) es un semiconductor III-V (tres-cinco) basado en galio del grupo 3B y arsénico del grupo 5B. Muchos **elementos de transición** (por ejemplo, el titanio, vanadio, hierro, níquel, cobalto, etc.) son particularmente útiles para conformar materiales magnéticos y ópticos debido a sus configuraciones electrónicas que les permiten tener múltiples valencias.

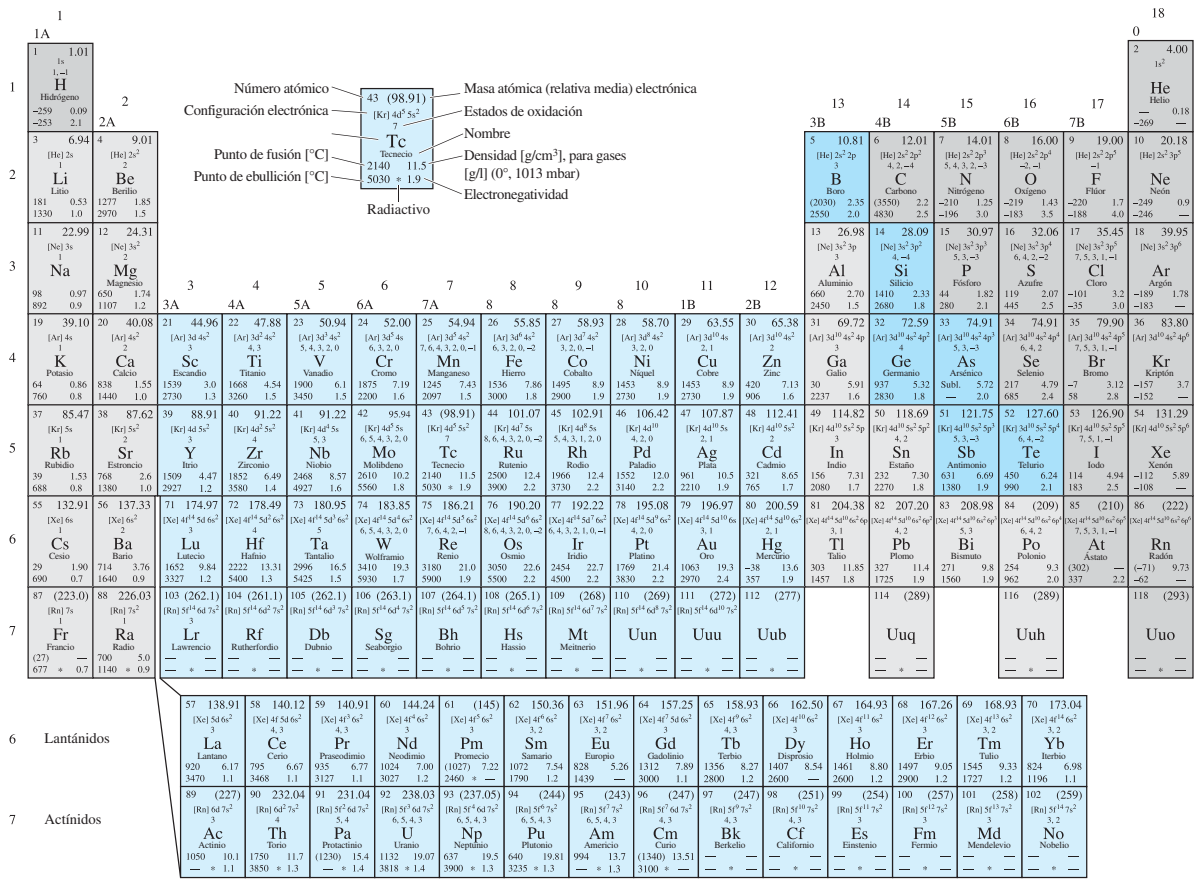
El orden de los elementos en la tabla periódica y el origen del principio de Aufbau se hacen aún más evidentes cuando se insertan en sus posiciones correctas los periodos de las series de lantánidos y actínidos (figura 2-10) en vez de colocarse debajo de la tabla periódica para conservar el espacio. La figura 2-10 indica el orbital particular que llena cada electrón adicional a medida que aumenta el número atómico. Observe que están indicadas las excepciones de aquellos elementos que no siguen el principio de Aufbau.

Tendencias en las propiedades

La tabla periódica contiene una abundancia de información útil (por ejemplo, la masa atómica, el número atómico de distintos elementos, etc.). También señala las tendencias en el tamaño atómico, los puntos de fusión y la reactividad química. Por ejemplo, el carbono (en su forma de diamante) tiene el punto de fusión más alto (3,550°C). Los puntos de fusión de los elementos que se encuentran debajo del carbono disminuyen (por ejemplo, el silicio (1,410°C), el germanio (937°C), el estaño (232°C) y el plomo (327°C)). Observe que la temperatura de fusión del Pb es mayor que la del Sn. La tabla periódica indica tendencias y variaciones no exactas de las propiedades.

Se pueden discernir tendencias en otras propiedades a partir de la tabla periódica. El diamante es un material con un espacio de banda muy grande (es decir, no es un conductor de electricidad muy eficaz), lo cual es consistente con el hecho de que el carbono (en forma de diamante) tenga el punto de fusión más alto entre los elementos del grupo 4B, lo cual sugiere que las fuerzas interatómicas son intensas (vea la sección 2-6). A medida que se desplaza hacia abajo en el grupo, el espacio de banda disminuye (los espacios de banda de los semiconductores Si y Ge son de 1.11 y 0.67 eV, respectivamente). Desplazándose más hacia abajo en el grupo 4, una forma del estaño es un semiconductor, mientras que otra forma es metálica. Si se observa el grupo 1A, se comprueba que el litio es altamente electropositivo (esto es, un elemento cuyos átomos desean participar en interacciones químicas mediante la donación de electrones y por lo tanto es altamente reactivo). De modo similar, si se desplaza hacia abajo en el grupo 1A, se puede observar que disminuye la reactividad química de los elementos.

Por lo tanto, la tabla periódica proporciona información útil acerca de las fórmulas, los números atómicos y las masas atómicas de los elementos. También ayuda a predecir o racionalizar las tendencias que afectan las propiedades de los elementos y compuestos. Esto explica por qué la tabla periódica es de gran utilidad para los científicos y los ingenieros.



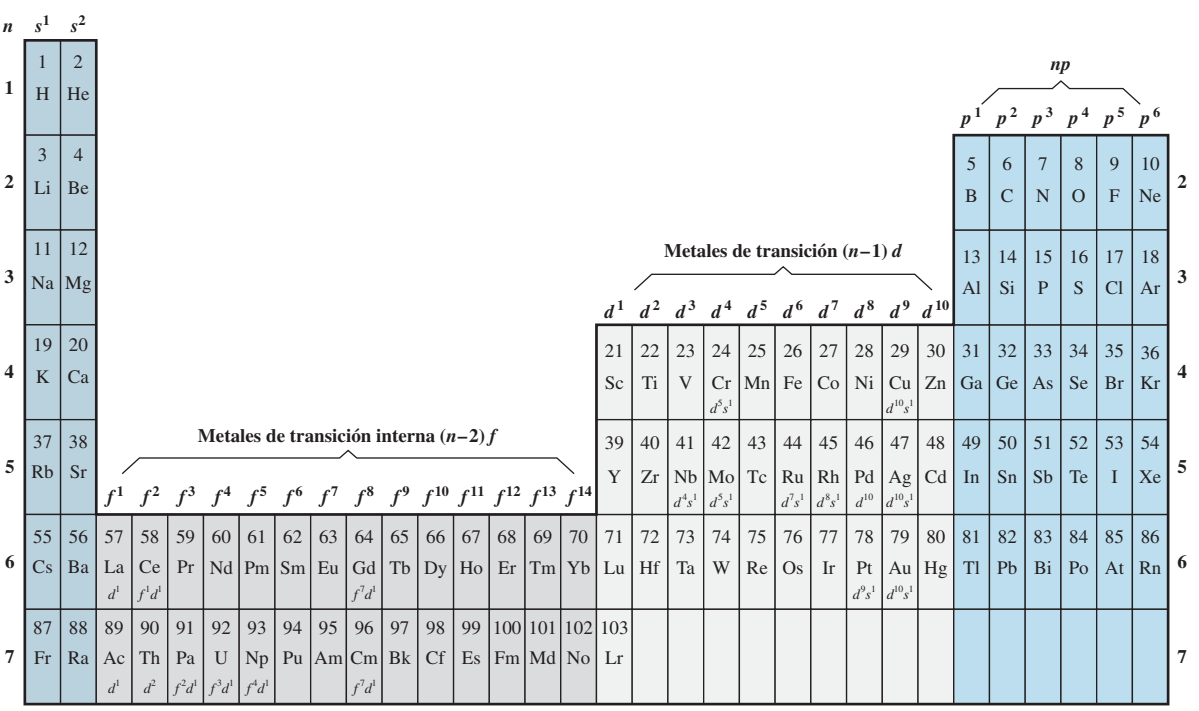


Figura 2-9 Tabla periódica de los elementos

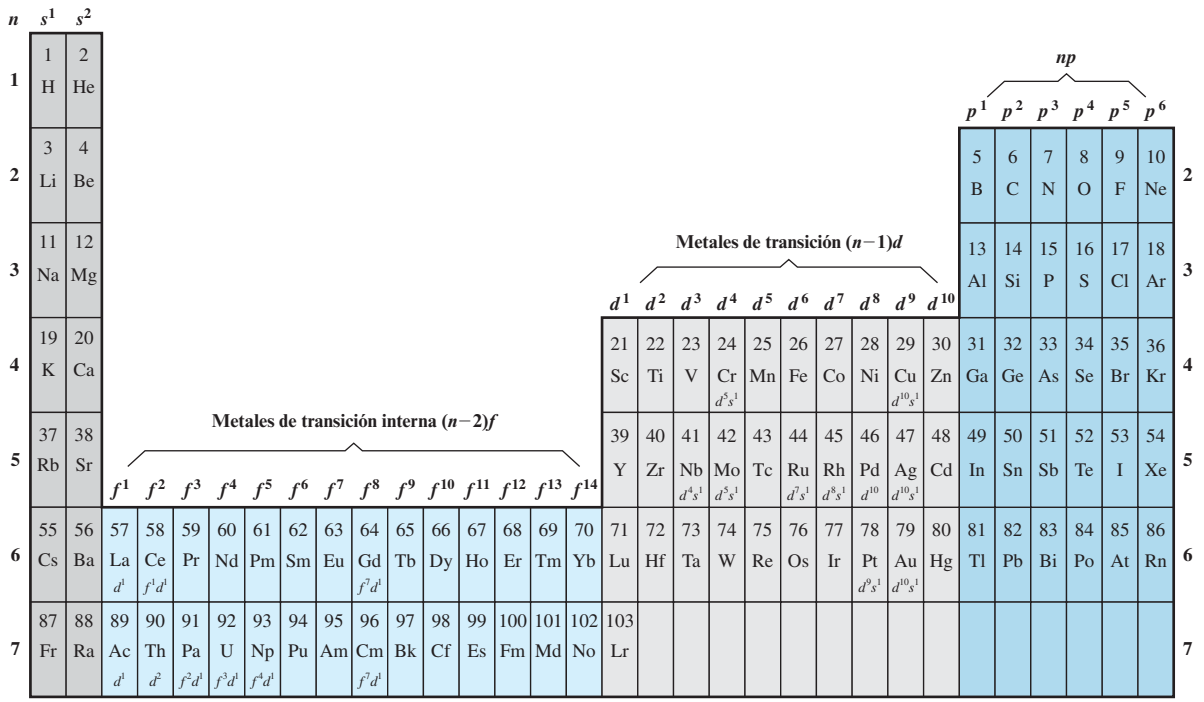


Figura 2-10 Tabla periódica en la cual los periodos de las series de lantánidos y actínidos están insertadas en las posiciones correctas. El nombre del grupo indica el orbital particular que está siendo llenado por cada electrón adicional a medida que aumenta el número atómico.

2-5 Enlace atómico

Existen cuatro mecanismos importantes por medio de los cuales se enlazan los átomos en los materiales de ingeniería, a saber:

1. **enlaces metálicos;**
2. **enlaces covalentes;**
3. **enlaces iónicos,** y
4. **enlaces de van der Waals.**

Los primeros tres tipos de enlaces son relativamente fuertes y se conocen como **enlaces primarios** (enlaces relativamente fuertes entre átomos adyacentes que resultan de la transferencia o compartición de los electrones orbitales externos). Las fuerzas de van der Waals son enlaces secundarios y se originan a partir de un mecanismo distinto y son relativamente más débiles. Se verá cada uno de estos tipos.

Enlace metálico

Los elementos metálicos tienen átomos electropositivos que donan sus electrones de valencia para formar un "mar" de electrones que rodea a los átomos (figura 2-11). Por ejemplo, el aluminio cede sus tres electrones de valencia, pero deja una parte central que consiste en el núcleo y los electrones internos. Dado que en esta parte central faltan tres electrones con carga negativa, tiene una carga positiva de tres. Los electrones de valencia se mueven con libertad dentro de infinidad de electrones y se asocian con varias partes centrales de átomos. Las partes centrales de iones con carga positiva se mantienen unidas por medio de la atracción mutua al electrón, por lo que producen un enlace metálico fuerte.

Debido a que sus electrones de valencia no están fijos en una sola posición, la mayoría de los metales puros son buenos conductores de electricidad a temperaturas relativamente bajas (menores de aproximadamente 300 K). En la zona de influencia de un voltaje aplicado los electrones de valencia se mueven y provocan que fluya una corriente si el circuito está cerrado.

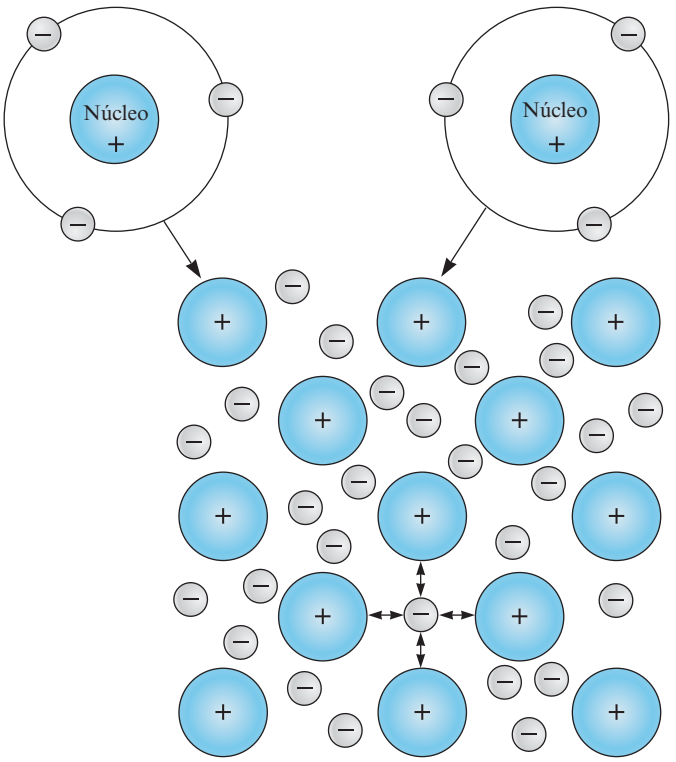


Figura 2-11 Se forma un enlace metálico cuando los átomos ceden sus electrones de valencia, que comienzan a formar infinidad de electrones. Las partes centrales de átomos con carga positiva se enlazan por medio de la atracción mutua a los electrones con carga negativa.

Los metales muestran buena ductilidad, dado que los enlaces metálicos son no direccionales. Existen otras razones importantes relacionadas con la microestructura que pueden explicar por qué los metales exhiben *resistencias más bajas* y *ductilidad más alta* que lo que puede anticiparse a partir de su enlazamiento. La **ductilidad** se refiere a la capacidad de los materiales para estirarse o flexionarse permanentemente sin romperse. En el capítulo 6 se explicarán con mayor detalle estos conceptos. En general, los puntos de fusión de los metales son relativamente altos. Desde el punto de vista de las propiedades ópticas, los metales son buenos reflectores de la radiación visible. Debido a su carácter electropositivo, varios metales como el hierro tienden a experimentar corrosión u oxidación. Muchos metales puros son buenos conductores de calor y se usan de manera eficaz en muchas aplicaciones de transferencia de calor. Es necesario destacar que el enlace metálico es *uno de los factores* en los esfuerzos que se llevan a cabo para racionalizar las tendencias observadas con respecto a las propiedades de los materiales metálicos. Como se verá en algunos de los siguientes capítulos, existen otros factores relacionados con la microestructura que también desempeñan una función crucial para determinar las propiedades de los materiales metálicos.

Enlace covalente

Los materiales con **enlace covalente** se caracterizan por enlaces que se forman por medio de la compartición de los electrones de valencia entre dos o más átomos. Por ejemplo, un átomo de silicio, que tiene una valencia de cuatro, obtiene ocho electrones en su capa de energía externa pues comparte sus electrones de valencia con cuatro átomos de silicio circundantes, como en la figura 2-12*a*) y *b*). Cada instancia de la compartición representa un enlace covalente; por lo tanto, cada átomo de silicio está enlazado a cuatro átomos vecinos por medio de cuatro enlaces covalentes. Para que se formen enlaces covalentes, los átomos de silicio deben arreglarse de tal manera que los enlaces tengan una **relación direccional** fija entre sí. Se forma una relación direccional cuando los enlaces entre los átomos de un material enlazado de manera covalente forman ángulos específicos, que dependen del material. En el caso del silicio, este arreglo produce un tetraedro, con ángulos de 109.5° entre los enlaces covalentes [figura 2-12*c*)].

Los enlaces covalentes son muy fuertes. Como resultado, los materiales enlazados de manera covalente son muy resistentes y duros. Por ejemplo, el diamante, el carburo de silicio (SiC), el nitruro de silicio (Si_3N_4) y el nitruro de boro (BN) tienen enlaces covalentes. Estos materiales también exhiben puntos de fusión muy altos, lo cual significa que pueden ser útiles en aplicaciones a altas temperaturas. Por otro lado, la temperatura alta necesaria para su procesamiento representa un desafío.

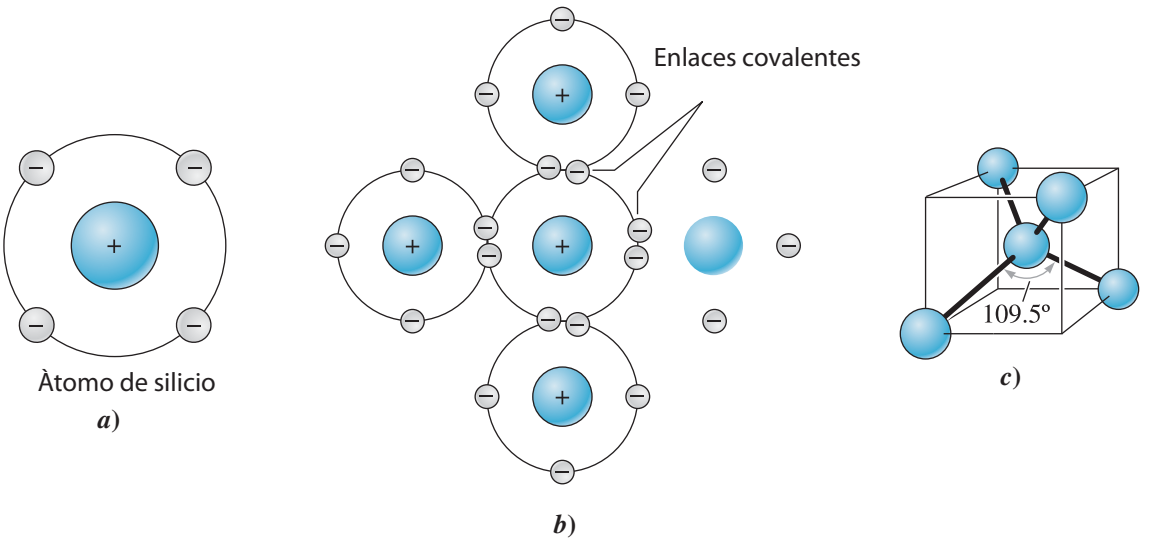


Figura 2-12 *a*) El enlazamiento covalente requiere que los electrones se compartan entre los átomos, de forma tal que cada átomo tenga lleno su orbital externo *sp*. *b*) En el silicio, con una valencia de cuatro, se deben formar cuatro enlaces covalentes. *c*) Los enlaces covalentes son direccionales. En el silicio se forma una estructura tetraédrica con ángulos de 109.5° encontrado entre cualquier par de enlaces covalentes.

Por lo general, los materiales enlazados de esta manera tienen ductilidad limitada, debido a que los enlaces tienden a ser direccionales. La conductividad eléctrica de muchos materiales enlazados de manera covalente (por ejemplo, el silicio, el diamante y muchas cerámicas) no es alta, dado que los electrones de valencia están encerrados en los enlaces entre los átomos y no están fácilmente disponibles para la conducción. Algunos de estos materiales, como el Si, pueden obtener niveles útiles y controlados de conductividad eléctrica si se les introducen de manera deliberada pequeños niveles de otros elementos conocidos como dopantes. Los polímeros conductores también son un buen ejemplo de materiales enlazados de manera covalente que pueden convertirse en materiales semiconductores. El desarrollo de polímeros conductores ligeros ha capturado la atención de muchos científicos e ingenieros, pues es muy útil para el desarrollo de componentes electrónicos flexibles.

¡No se puede predecir de manera sencilla si un material tendrá una resistencia alta o baja, ductilidad o tendencia a quebrarse, basándose simplemente en la naturaleza del enlazamiento! Se necesita información adicional sobre las estructuras atómicas, micro y macro del material; sin embargo, la naturaleza del enlazamiento señala una tendencia para los materiales con ciertos tipos de enlazamiento y composiciones químicas. El ejemplo 2-2 explora cómo se unen el oxígeno y el silicio a través de uno de tales enlaces para formar la sílice.

Ejemplo 2-2 *¿Cómo se unen los átomos de oxígeno y silicio para formar la sílice?*

Suponiendo que la sílice (SiO_2) tiene un enlace 100% covalente, describa cómo se unen los átomos de oxígeno y silicio.

SOLUCIÓN

El silicio tiene una valencia de cuatro y comparte electrones con cuatro átomos de oxígeno, lo que da un total de ocho electrones por cada átomo de silicio. El oxígeno tiene una valencia de seis y comparte electrones con dos átomos de silicio, lo que da al oxígeno un total de ocho electrones. La figura 2-13 ilustra una de las estructuras posibles. De manera similar al silicio, se produce una estructura tetraédrica. Más adelante en el capítulo se explicará cómo se justifica la naturaleza iónica y covalente del enlazamiento en la sílice.

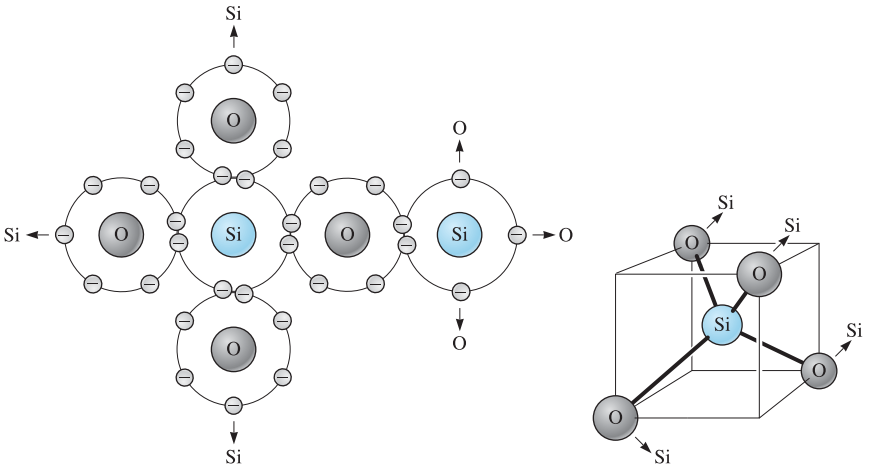


Figura 2-13 Estructura tetraédrica de la sílice, la cual contiene enlaces covalentes entre los átomos de silicio y oxígeno (para el ejemplo 2-2).

Enlace iónico

Cuando está presente más de un tipo de átomo en un material, uno de ellos puede donar sus electrones de valencia a un átomo distinto para llenar la capa de energía externa del segundo átomo. Ambos átomos tienen ahora niveles de energía externos llenos (o vacíos), pero han adquirido una carga eléctrica y se comportan como iones. Al átomo que aporta los electrones y que se queda con una carga neta positiva se le llama **catión**, mientras que al átomo que acepta los electrones y adquiere una carga neta negativa se le llama **anión**. Entonces, los iones con carga opuesta son atraídos entre sí y producen el **enlace iónico**. Por ejemplo, la atracción entre los iones de sodio y los de cloruro (figura 2-14) produce cloruro de sodio (NaCl), o sal de mesa.

Enlace de van der Waals

El origen de las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas es de naturaleza mecánica cuántica, por lo que una explicación detallada está más allá del alcance de este libro. Aquí se presenta una descripción simplificada. Si dos cargas eléctricas $+q$ y $-q$ están separadas por una distancia d, el momento dipolar se define como q y d. Los átomos son eléctricamente neutros. Además, los centros de la carga positiva (núcleo) y de la carga negativa (nube de electrones) coinciden. Por lo tanto, un átomo neutro no tiene momento dipolar. Cuando se expone un átomo neutro a un campo eléctrico interno o externo, el átomo puede polarizarse (es decir, los centros de las cargas positiva y negativa se separan). Esta polarización crea o induce un momento dipolar (figura 2-15). En algunas moléculas no se tiene que inducir el momento dipolar, sino que este existe por virtud de la dirección de los enlaces y la naturaleza de los átomos. A estas moléculas se les

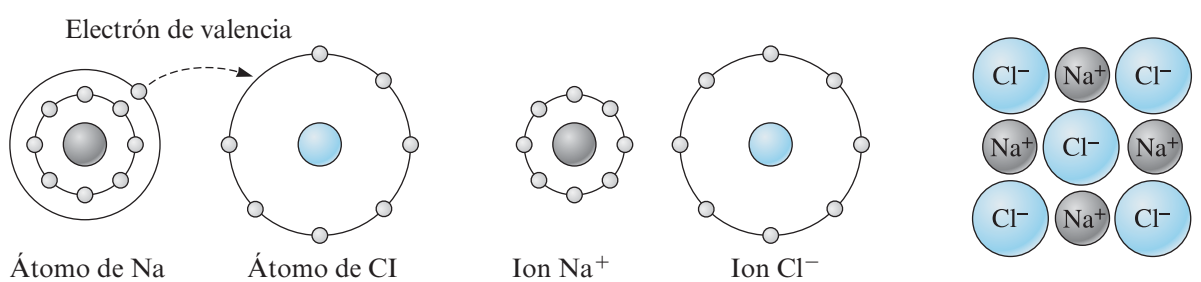


Figura 2-14 Se crea un enlace iónico entre dos átomos diferentes con electronegatividades distintas. Cuando el sodio dona su electrón de valencia al cloro, cada átomo se convierte en un ion, ocurre una atracción y se forma el enlace iónico.

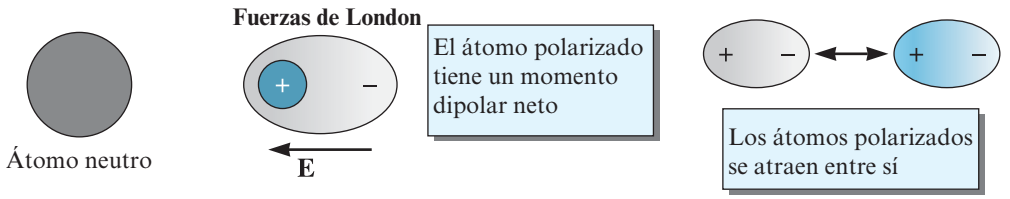


Figura 2-15 Ilustración de las fuerzas de London, un tipo de fuerza de van der Waals, entre átomos.

conoce como **moléculas polarizadas**. El agua es un ejemplo de tales moléculas que tiene un momento dipolar inherente permanente (figura 2-16).

Las moléculas o átomos en los que hay un momento dipolar inducido o permanente se atraen entre sí. A la fuerza resultante se le conoce como fuerza de van der Waals. Las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas tienen su origen en las interacciones entre los dipolos que son inducidos o en algunos casos en las interacciones entre los dipolos permanentes que están presentes en ciertas moléculas polares. Lo que es único acerca de estas fuerzas es que están presentes en todos los materiales.

Existen tres tipos de interacciones de **van der Waals**, llamadas fuerzas de London, fuerzas de Keesom y fuerzas de Debye. Si las interacciones son entre dos dipolos que están inducidos en los átomos o moléculas, se conocen como **fuerzas de London** (por ejemplo, el tetracloruro de carbono) (figura 2-15). Cuando un dipolo inducido (esto es, un dipolo que se induce en un átomo o una molécula que de otra manera sería no polar) interacciona con una molécula que tiene un momento dipolar permanente, esta interacción se conoce como **interacción de Debye**. Un ejemplo de esta interacción serían las fuerzas que existen entre las moléculas de agua y las del tetracloruro de carbono.

Si las interacciones son entre moléculas que están polarizadas de manera permanente (por ejemplo, las moléculas de agua que atraen otras moléculas de agua u otras moléculas polares), se conocen como **interacciones de Keesom**. La atracción entre las regiones con carga positiva de una molécula de agua y las regiones con carga negativa de una segunda molécula de agua producen un enlace atractivo entre ambas (figura 2-16).

Con frecuencia, al enlace entre moléculas que tienen un momento dipolar permanente, conocido como fuerza de Keesom, se le conoce como **enlace de hidrógeno**, pues los átomos de este elemento representan una de las regiones polarizadas. Por lo tanto, el enlace de hidrógeno es en esencia una fuerza de Keesom y es un tipo de fuerza de van der Waals. La fuerza de Keesom relativamente intensa entre las moléculas de agua es la razón por la cual la tensión superficial (72 mJ/m^2 o dina/cm a temperatura ambiente) y el punto de ebullición del agua (100°C) son mucho más altos que los de varios líquidos orgánicos de peso molecular comparable (tensión superficial de ~20 a 25 dina/cm, puntos de ebullición superiores a 80°C).

Observe que los enlaces de van der Waals son **enlaces secundarios**, pero los átomos dentro de la molécula o grupo de átomos están unidos por medio de enlaces covalentes o iónicos fuertes. Cuando se calienta el agua hasta el punto de ebullición, se rompen los enlaces de van der Waals y el agua se transforma en vapor, pero se requieren temperaturas mucho más altas para romper los enlaces covalentes que unen los átomos de oxígeno e hidrógeno.

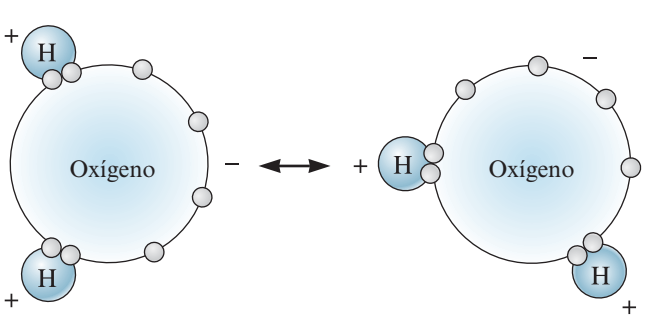


Figura 2-16 Las interacciones de Keesom se forman como resultado de la polarización de las moléculas o grupos de átomos. En el agua, los electrones del oxígeno tienden a concentrarse lejos del hidrógeno. La diferencia de carga resultante permite que la molécula se enlace de manera débil a las demás moléculas de agua.

Aunque denominados “secundarios”, con base en las energías de enlace, las fuerzas de van der Waals desempeñan una función muy importante en varias áreas de la ingeniería. Las fuerzas de van der Waals entre átomos y moléculas desempeñan una función vital para determinar la tensión superficial y los puntos de ebullición de los líquidos. En la ciencia e ingeniería de materiales, la tensión superficial de los líquidos y la energía superficial de los sólidos intervienen en diferentes situaciones. Por ejemplo, cuando se desea procesar polvos cerámicos o metálicos en partes sólidas densas, con frecuencia los polvos tienen que dispersarse en agua o en líquidos orgánicos. Que se pueda lograr esta dispersión de manera eficaz depende de la tensión superficial del líquido y de la energía superficial del material sólido. La tensión superficial de los líquidos también asume importancia cuando se deben procesar metales y aleaciones fundidas (por ejemplo vaciado) y vidrios.

Los enlaces de van der Waals alteran de manera considerable las propiedades de ciertos materiales. Por ejemplo, el grafito y el diamante tienen propiedades mecánicas muy distintas, en parte debido a la presencia de los enlaces van der Waals en el grafito, tema que se analizará en la sección 2-7. Las moléculas de varios materiales plásticos contienen partes polares o grupos laterales (por ejemplo, el algodón o la celulosa, el PVC, el Teflón). Las fuerzas de van der Waals proporcionan una fuerza de unión extra entre las cadenas de estos polímeros (figura 2-17).

Los polímeros en los que las fuerzas de van der Waals son más intensas tienden a ser relativamente más rígidos y exhiben temperaturas de transición vítrea relativamente más altas (T_g). La temperatura de transición vítrea es una temperatura inferior a la cual algunos polímeros tienden a comportarse como materiales quebradizos (es decir, muestran una mala ductilidad). Como resultado, los polímeros con enlazamiento de van der Waals (además de los enlaces covalentes en las cadenas y en los grupos laterales) son relativamente quebradizos a temperatura ambiente (por ejemplo, el PVC).

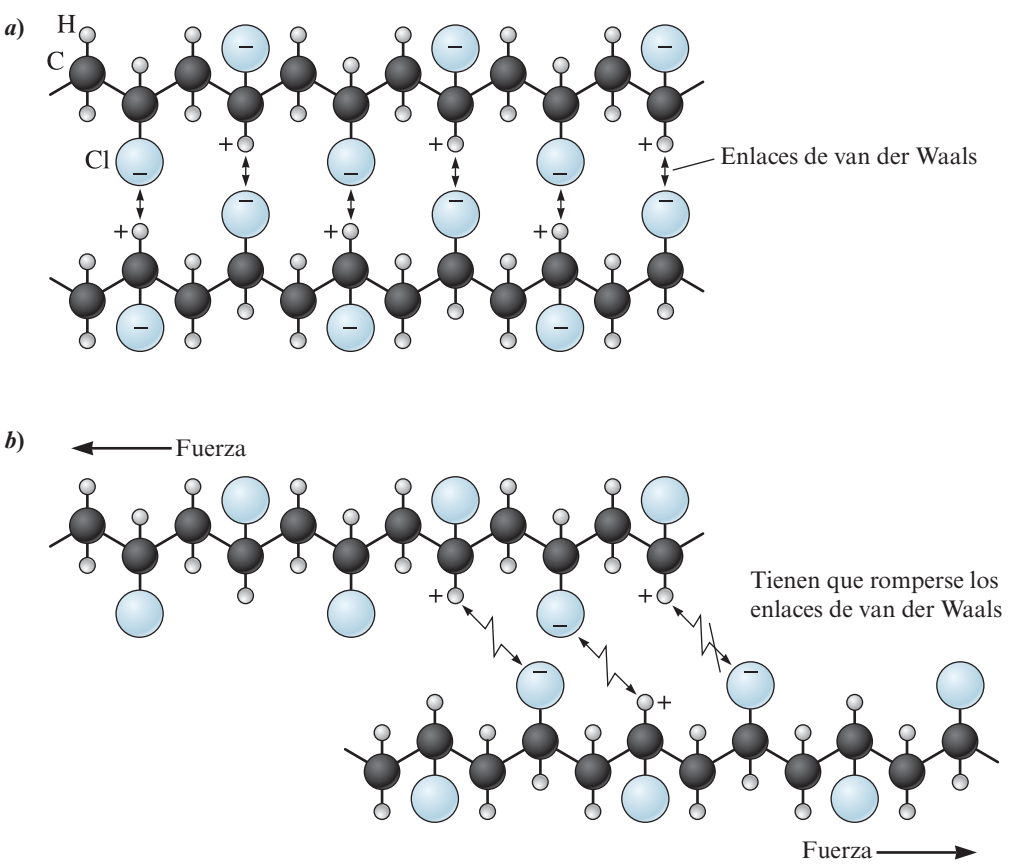


Figura 2-17 *a*) En el cloruro de polivinilo (PVC), los átomos de cloro unidos a la cadena del polímero tienen carga negativa y los átomos de hidrógeno tienen carga positiva. Las cadenas se enlazan de manera débil por medio de enlaces de van der Waals. Este enlazamiento adicional otorga mayor rigidez al PVC. *b*) Cuando se aplica una fuerza al polímero, se rompen los enlaces de van der Waals y las cadenas se deslizan entre sí.

Para procesar tales polímeros se deben "plastificar" mediante la adición de otras moléculas polares más pequeñas que interaccionan con las partes polares de las cadenas largas de polímero, por lo que disminuye la T_g y mejora la flexibilidad.

Enlaces mixtos En la mayoría de los materiales, el enlazamiento entre los átomos es una mezcla de dos o más tipos. Por ejemplo, el hierro se enlaza por medio de una combinación de enlace metálico y covalente que evita que los átomos se empaquen de una manera tan eficiente como podría esperarse.

Los compuestos formados a partir de dos o más metales (**compuestos intermetálicos**) pueden estar enlazados por medio de una mezcla de enlaces metálicos y iónicos, en particular cuando existe una gran diferencia en electronegatividad entre los elementos. Debido a que el litio tiene una electronegatividad de 1.0 mientras que la del aluminio es de 1.5, se debería esperar que el AlLi tuviese una combinación de enlace metálico y iónico. Por otro lado, debido a que el aluminio y el vanadio tienen electronegatividades de 1.5, sería de esperar que el Al_3V estuviera enlazado principalmente por medio de enlaces metálicos.

Muchos compuestos cerámicos y semiconductores, los cuales son combinaciones de elementos metálicos y no metálicos, tienen una mezcla de enlaces covalentes y iónicos. A medida que aumenta la diferencia entre la electronegatividad de los átomos, el enlace se vuelve más iónico. La fracción del enlace que es covalente puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Fracción covalente} = \exp(-0.25\Delta E^2) \tag{2-1}$$

donde ΔE es la diferencia entre las electronegatividades. El ejemplo 2-3 explora la naturaleza de los enlaces en la sílice.

Ejemplo 2-3 *Cómo determinar si la sílice está enlazada de manera iónica o covalente*

En el ejemplo anterior se utilizó la sílice (SiO_2) como ejemplo de un material enlazado de manera covalente. En realidad, la sílice tiene enlazamiento iónico y covalente. ¿Qué fracción del enlazamiento es covalente? Dé ejemplos de aplicaciones en las que se utiliza la sílice.

SOLUCIÓN

A partir de la figura 2-9, la electronegatividad del silicio es de 1.8 y la del oxígeno de 3.5. La fracción del enlazamiento que es covalente es

$$\text{Fracción covalente} = \exp[-0.25(3.5 - 1.8)^2] = 0.486$$

Aunque el enlazamiento covalente solo representa alrededor de la mitad del enlace, la naturaleza direccional de estos enlaces continúa desempeñando una función importante en la estructura del SiO_2.

La sílice tiene muchas aplicaciones. Se utiliza para fabricar fibras de vidrio y ópticas. Se adicionan nanopartículas de sílice a los neumáticos para incrementar la rigidez del caucho. Los cristales de silicio (Si) de alta pureza se fabrican mediante la reducción de la sílice a silicio.

2-6 Energía de unión y espaciado interatómico

Espaciado interatómico La distancia de equilibrio entre átomos es ocasionada por un balance entre las fuerzas de repulsión y atracción. Por ejemplo, en el enlace metálico la atracción entre los electrones y las partes centrales de los iones está balanceada por la repulsión entre las partes centrales de los iones. La separación de equilibrio se establece cuando la energía interatómica total (EIA) del par de átomos está en un punto mínimo, o cuando no actúa una fuerza neta para atraer o repeler los átomos (figura 2-18).

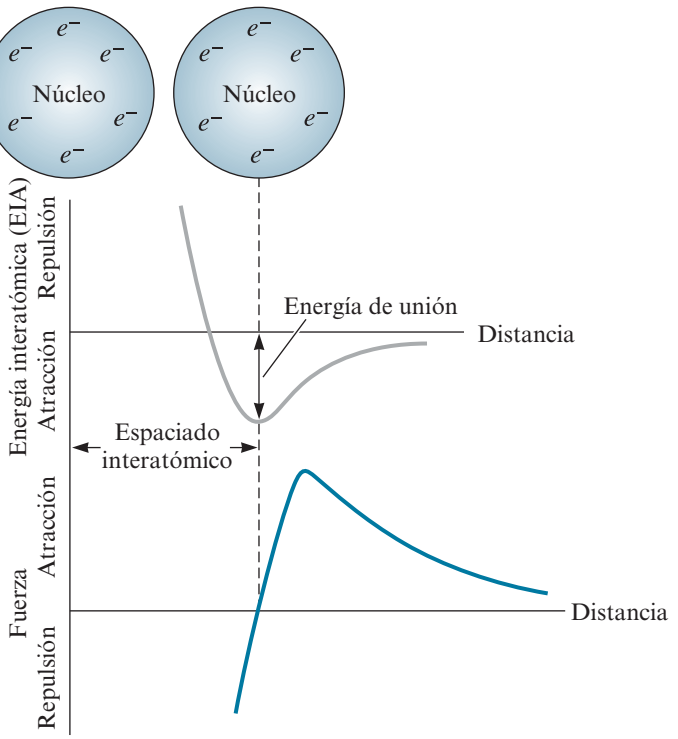


Figura 2-18 Los átomos o iones son separados por un espaciado de equilibrio que corresponde a la energía interatómica mínima de un par de átomos o iones (o cuando actúa una fuerza cero para repeler o atraer los átomos o iones).

El **espaciado interatómico** en un metal sólido es *aproximadamente* igual al diámetro atómico, o al doble del radio atómico *r*. Sin embargo, no se puede utilizar esta aproximación en el caso de materiales enlazados por medio de iones dado que el espaciado es la suma de dos radios iónicos distintos. En el apéndice B se presentan los radios atómicos y iónicos de los elementos, datos que se utilizarán en el siguiente capítulo.

La energía mínima en la figura 2-18 es la **energía de unión**, o la energía que se requiere para crear o romper el enlace. En consecuencia, los materiales que tienen una alta energía de unión también tienen altas resistencia y temperatura de fusión. Los materiales enlazados de manera iónica tienen una energía de unión particularmente grande (tabla 2-2), debido a la gran diferencia entre las electronegatividades de los iones. Los metales tienen energías de unión más bajas, debido a que las electronegatividades de los átomos son similares.

Se pueden relacionar otras propiedades a las expresiones fuerza-distancia y energía-distancia de la figura 2-19. Por ejemplo, el **módulo de elasticidad** de un material [la pendiente (E) de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica, también conocida como módulo de Young] está relacionada con la pendiente de la curva fuerza-distancia (figura 2-19). Una pendiente pronunciada, la cual está correlacionada con una mayor energía de unión y un punto de fusión también más alto, significa que se requiere una fuerza mayor para estirar el enlace; por lo tanto, el material tiene un módulo de elasticidad alto.

Una indicación interesante y necesaria es que no todas las propiedades de los materiales de ingeniería son sensibles a la microestructura. El módulo de elasticidad es una de tales propiedades. Si se tienen dos muestras de aluminio que tienen en esencia la misma composición química pero distinto tamaño del grano, se debe esperar que el módulo de elasticidad de estas muestras sea casi el mismo; sin embargo, los **límites elásticos** de las muestras, es decir, el nivel de esfuerzo al que el

Tabla 2-2 Energías de unión de los cuatro mecanismos de enlace

Enlace	Energía de enlace (kcal/mol)
Iónico	150–370
Covalente	125–300
Metálico	25–200
Van der Waals	<10

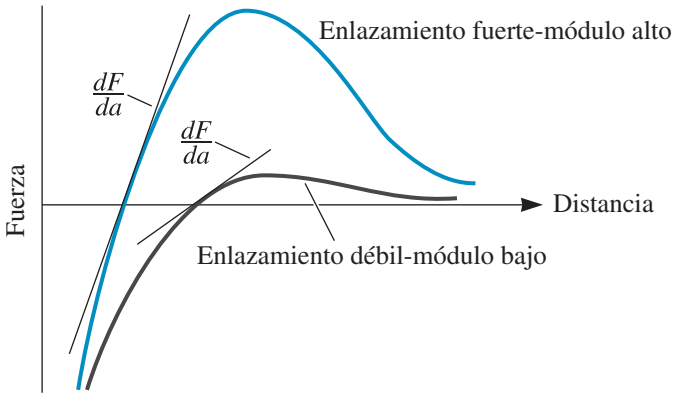


Figura 2-19 Curva fuerza-distancia (*F-a*) de dos materiales, que muestra la relación entre el enlace atómico y el módulo de elasticidad. Una pendiente *dF/da* pronunciada genera un módulo alto.

material comienza a deformarse de manera permanente, será bastante diferente. Por ello, el límite elástico es una propiedad sensible a la microestructura. En los capítulos subsecuentes se aprenderá que, en comparación con otras propiedades mecánicas como el límite elástico y la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad no depende en gran medida de la microestructura. El módulo de elasticidad puede relacionarse de manera directa con la rigidez de los enlaces entre los átomos (capítulo 15). Por lo tanto, el módulo de elasticidad depende principalmente de los átomos que conforman el material.

Otra propiedad que puede relacionarse con la energía de unión o las curvas fuerza-distancia interatómica es el **coeficiente de expansión térmica** (CET). El CET, que a menudo se denota como α, es el cambio fraccional en dimensión lineal de un material por grado de temperatura. Puede escribirse $\alpha = (1/L)(dL/dT)$, donde L es la longitud y T la temperatura. El CET está relacionado con la asimetría de la curva de energía-separación (figura 2-20). Para que aumente la separación de equilibrio entre los átomos, se debe suministrar energía al material. En una curva de energía-separación simétrica, la separación media entre los átomos en equilibrio aproximadamente se mantiene cuando se suministra energía. Este tipo de material tiene un bajo coeficiente de expansión térmica. Los materiales con un bajo coeficiente de expansión térmica mantienen sus dimensiones de manera más exacta cuando cambia la temperatura. Un material con un alto coeficiente de expansión térmica tiene una curva de energía-separación asimétrica, en la que la separación media entre los átomos en equilibrio aumenta cuando se suministra energía. Es importante observar que existen características microestructurales (por ejemplo, la *anisotropía* o variación de propiedades, en la expansión térmica junto con las distintas direcciones cristalográficas) que también tienen un efecto significativo sobre el coeficiente de expansión térmica total de un material de ingeniería.

Los materiales que pueden expandirse muy poco son útiles en varias aplicaciones donde se espera que los componentes experimenten de manera repetida calentamiento y enfriamiento rela-

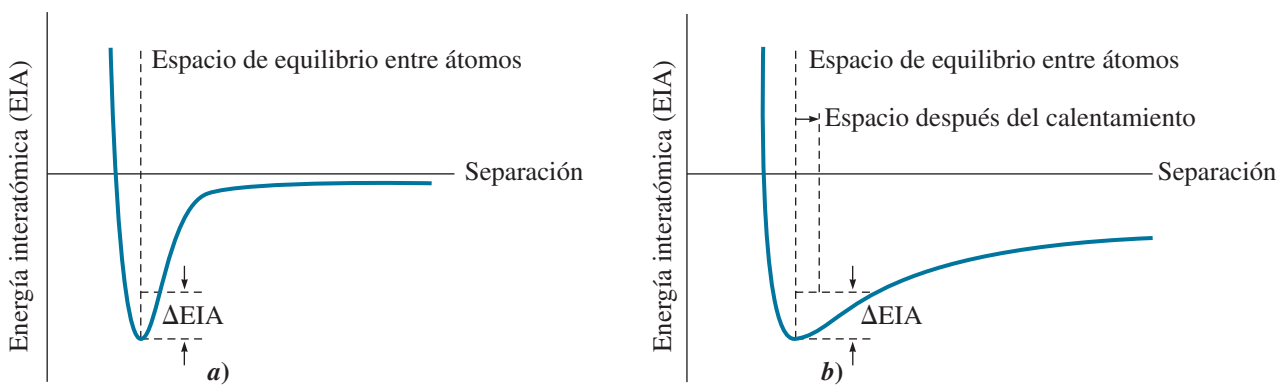


Figura 2-20 El coeficiente de expansión térmica se relaciona con la forma de la curva de energía interatómica (EIA)- curva separación de dos átomos. *a*) Una curva simétrica tiene un bajo coeficiente de expansión térmica (como se muestra, cercano a cero). *b*) Una curva asimétrica tiene un coeficiente de expansión térmica relativamente alto. Los mínimos de estas curvas se muestran al mismo nivel de energía para poner de relieve la simetría o asimetría, pero por lo general un material con un bajo CET también tiene una energía de unión alta, es decir una alta temperatura de fusión y depresión profunda.

tivamente rápidos. Por ejemplo, las cerámicas de cordierita (que se utilizan como catalizadores de soporte en los convertidores catalíticos de los automóviles), los vidrios de expansión ultrabaja (EUB), Visionware^{MR} y otros vidrios-cerámicos desarrollados por Corning, tienen pequeños coeficientes de expansión térmica. En el caso de las películas delgadas o los recubrimientos de los sustratos, no solo se tiene interés en los valores reales de los coeficientes de expansión térmica sino también en la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica entre el sustrato y la película o recubrimiento. Una diferencia muy grande entre estos provoca el desarrollo de esfuerzos que pueden conducir a la delaminación o a la deformación de la película o recubrimiento.

2-7 Las muchas formas del carbono: relaciones entre los arreglos de los átomos y las propiedades materiales

El carbono es uno de los elementos más abundantes en la Tierra. Es un componente esencial de todos los organismos vivos y tiene una significancia tecnológica enorme con un gran intervalo de aplicaciones. Por ejemplo, la datación por carbono es un proceso por medio del cual los científicos miden la cantidad de un isótopo de carbono radiactivo que está presente en los fósiles para determinar su edad. Además, en la actualidad algunas de las tecnologías de punta explotan uno de los materiales más resistentes del mundo: los nanotubos de carbono. Y por supuesto, una cantidad pequeña de carbono (por ejemplo 0.5% en peso) convierte el hierro en acero.

El carbono puro existe como diversos **alótropos**, lo que significa que se encuentra en distintas formas (o tiene diferentes arreglos de sus átomos) que dependen de la temperatura y la presión. En el capítulo 3 se aprenderá más acerca de los alótropos del carbono, dos de los cuales son muy familiares para nosotros: el diamante y el grafito, mientras que otras tres formas del carbono se han descubierto de manera más reciente: el grafeno, que consiste en una capa única de átomos de carbono, el buckminsterfullereno también conocido como "buckybalon" y los nanotubos de carbono. En realidad, existen otros alótropos del carbono que no se explicarán aquí.

Los alótropos del carbono tienen la misma composición —son carbono puro—, y aun así muestran propiedades materiales considerablemente distintas. La clave para comprender estas diferencias es entender cómo se arreglan los átomos en cada alótropo.

En este capítulo explicamos que el carbono tiene un número atómico de seis, lo que significa que tiene seis protones. Por lo tanto, un átomo de carbono neutro tiene seis electrones. Dos de ellos ocupan la capa cuántica más interna (llenándola por completo) y cuatro ocupan la capa cuántica con el número cuántico principal $n = 2$. Cada átomo de carbono tiene cuatro electrones de valencia y puede compartir electrones con hasta cuatro átomos distintos. Por lo tanto, los átomos de carbono pueden combinarse con otros elementos al igual que con otros átomos de carbono. Esta facilidad para combinarse permite que el carbono forme muchos compuestos distintos de estructura distinta al igual que varios alótropos de carbono puro.

La cultura popular valora uno de los alótropos de carbono sobre los demás: el diamante. La figura 2-21*a*) es un diagrama que muestra la unidad de repetición de la estructura del diamante. Cada esfera es un átomo y cada línea representa los enlaces covalentes entre los átomos de carbono. En el capítulo 3 aprenderá a realizar diagramas como este. El diamante es un cristal, lo que significa que sus átomos se ordenan en un arreglo regular repetido. La figura 2-21a) muestra que cada átomo de carbono está enlazado a otros cuatro átomos del mismo elemento. Estos enlaces son covalentes, lo que significa que cada átomo de carbono comparte cada uno de sus electrones más externos con un átomo de carbono adyacente, por lo que cada átomo tiene su capa cuántica más externa llena. Recuerde de la sección 2-5 que los enlaces covalentes son enlaces fuertes. La figura 2-21*b*) muestra de nuevo la estructura del diamante, pero la vista ha sido rotada 45 grados sobre el eje vertical a partir de la figura 2-21*a*). Desde esta perspectiva podemos observar canales hexagonales en la estructura del diamante.

El enlace covalente predominante en el diamante influye de manera profunda en sus propiedades macroscópicas. El diamante es uno de los materiales con punto de fusión más alto conocido con una temperatura de fusión de 3,550°C (6,420°F), lo cual se debe al enlazamiento covalente fuerte

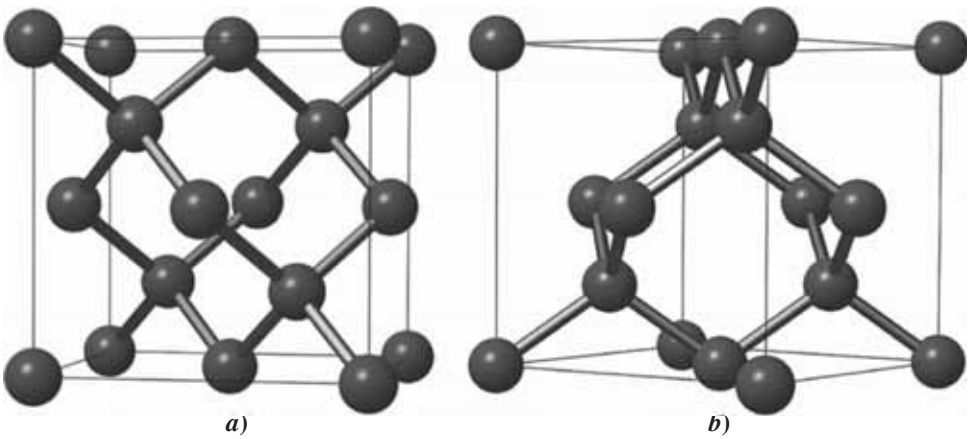


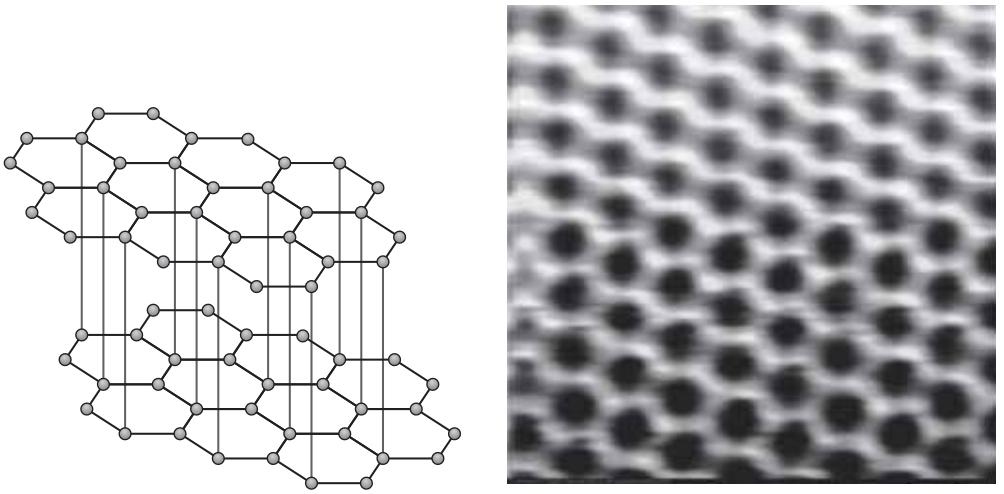
Figura 2-21 Estructura del diamante. *a*) Unidad de repetición del cristal de diamante, también conocida como la celda unitaria del diamante. *b*) La misma imagen que en *a*) rotada 45° sobre el eje vertical.

entre los átomos. El diamante también tiene una de las conductividades térmicas más altas conocidas (2,000 W/(m-K)). Por comparación, el aluminio (que es un excelente conductor térmico) tiene una conductividad térmica de sólo 238 W/(m-K). La alta conductividad térmica del diamante se debe a la rigidez de su estructura enlazada de manera covalente. El diamante es el material más rígido con un módulo de elasticidad de 1,100 GPa. (En el capítulo 6 se tratará más acerca del módulo elástico; por ahora, simplemente hay que decir que el diamante es casi 10 veces más rígido que el titanio y más de 15 veces más que el aluminio.) A medida que se calienta el material, los átomos vibran con más energía. Cuando los enlaces son rígidos, las vibraciones se transfieren de manera eficiente entre los átomos, por lo que conducen calor. Por otro lado, el diamante es un aislante eléctrico. Todos los electrones de valencia de cada átomo de carbono están compartidos con los átomos vecinos, lo que no deja electrones libres para conducir electricidad. (Por lo general, un aislante eléctrico también es un mal conductor de calor, debido a que carece de electrones libres, pero el diamante es una excepción debido a su rigidez extraordinaria.) El diamante es una de las sustancias conocidas más duras, lo cual explica por qué se usa con frecuencia en herramientas de corte en aplicaciones industriales (la superficie de corte necesita ser más dura que el material que se desea cortar).

El pariente menos lustroso (y brillante) del diamante es el grafito que, como el diamante puro, sólo contiene átomos de carbono, pero usted sabe a partir de la experiencia de escribir con lápices de grafito que las propiedades de este material son significativamente distintas de las del diamante. En el grafito, los átomos de carbono se arreglan en capas. En cada capa, los átomos se ordenan en un patrón hexagonal, como se muestra en la figura 2-22*a*). Recuerde que en el diamante cada átomo de carbono está enlazado de manera covalente a otros cuatro, pero en cada capa de grafito cada átomo de carbono está enlazado de manera covalente a sólo otros tres. Existe un cuarto enlace entre las capas, pero éste es un enlace de van der Waals mucho más débil. También, el espaciado entre las capas del grafito es 2.5 veces mayor que el espaciado entre los átomos de carbono en el plano.

La figura 2-22*b*) es una imagen que se obtuvo mediante un instrumento conocido como microscopio de fuerza atómica (MFA). Un MFA escanea una punta afilada sobre la superficie de una muestra. La deflexión de la punta voladiza es rastreada por medio de un láser y un fotodetector sensible a la posición. En el MFA en modo de contacto, un actuador mueve la muestra con respecto a la punta para mantener una deflexión constante. De esta manera, se mapea la superficie de la muestra como una función de la altura. La figura 2-22*b*) muestra los átomos de carbono en una sola capa de grafito. Los átomos de carbono individuales son visibles. De nueva cuenta, se observa que aunque los modelos de barras y esferas de los cristales pueden parecer un tanto aproximados, son en realidad representaciones precisas de los arreglos atómicos en los materiales.

Como el diamante, el grafito tiene un punto de fusión alto. Cuando se calienta un sólido hasta el punto en el que este se licua, el espaciado entre los átomos debe incrementarse. En el grafito, no es difícil separar las capas individuales, debido a que los enlaces entre ellas son débiles (en realidad, esto es lo que usted hace cuando escribe con un lápiz de grafito, pues las capas se separan y se quedan en el papel), pero cada átomo de carbono tiene tres enlaces fuertes en la capa que provoca



a) ***b***)

Figura 2-22 Estructura del grafito. *a*) Los átomos de carbono están arreglados en capas y en cada una de ellas los átomos de carbono están ordenados en un patrón hexagonal. *b*) Micrografía de la fuerza atómica del grafito. (*Cortesía de la University of Augsburg*)

que el grafito tenga un punto de fusión alto. El grafito tiene una densidad menor que la del diamante, debido a su estructura de capas: los átomos no están empacados de manera compacta entre sí. A diferencia del diamante, el grafito es eléctricamente conductor. Esto se debe a que el cuarto electrón de cada átomo de carbono, el cual no está enlazado de manera covalente en el plano, está disponible para conducir electricidad.

El grafeno está conformado por una sola capa de grafito y representa un alótropo de carbono distinto. Es un excelente conductor térmico, y al igual que el grafito, es resistente y conduce electricidad. El grafeno es notablemente transparente, ya que comprende una capa única. Existe mucho entusiasmo en relación con el potencial que tiene este material para usarlo en los transistores, ya que sus electrones viajan a velocidades cercanas a la de la luz. El grafeno también puede usarse en pantallas de cristal líquido (LCD). La superficie de grafito que observamos en la figura 2-22*b*) tiene una apariencia casi idéntica al grafeno.

El buckminsterfullereno, un alótropo del carbono, fue descubierto en 1985. Cada molécula que lo conforma, conocida como "buckybalon", contiene 60 átomos de carbono y se conoce como C60. Un buckybalon puede visualizarse considerando un patrón bidimensional de 12 pentágonos regulares y 20 hexágonos regulares ordenados como en la figura 2-23*a*). Si este patrón se pliega en una estructura tridimensional, es decir, si se envuelve el renglón central en un círculo y se pliega cada extremo para formar tapas extremas, entonces los polígonos se ajustan entre sí de manera perfecta, ¡como un balón de fútbol sóccer! Esta es una estructura altamente simétrica con 60 esquinas, y si se coloca un átomo de carbono en cada esquina, entonces es un modelo de la molécula de C60.

El buckminsterfullereno fue nombrado así por el matemático y arquitecto estadounidense R. Buckminster Fuller, quien patentó el diseño del domo geodésico. Cuando se pasa una corriente grande de alrededor de 150 amperes a través de una barra de carbono, se crean buckybalones. Los buckybalones se encuentran en el hollín creado de esta manera al igual que en el hollín en estado natural, como el residuo de carbono de una vela que se quema.

La figura 2-23*b*) es un modelo de un buckybalon sencillo. Cada uno de los 60 átomos de carbono tiene dos enlaces sencillos y un enlace doble. En realidad, existen formas distintas del C60; por ejemplo, el C70, que forma una clase de materiales de carbono conocidos por lo general como fullerenos. Los buckybalones pueden contener otros átomos dentro de ellos, parecen ser bastante fuertes y tienen propiedades magnéticas y superconductoras interesantes.

Los nanotubos de carbono, un cuarto alótropo del carbono, pueden visualizarse como hojas de grafito enrolladas en tubos con tapas hemisféricas de fullereno en los extremos. Una hoja sencilla de grafito, conocida como grafeno, puede enrollarse en distintas direcciones para producir nanotubos con distintas configuraciones, como se muestra en la figura 2-24*a*). Los nanotubos pueden

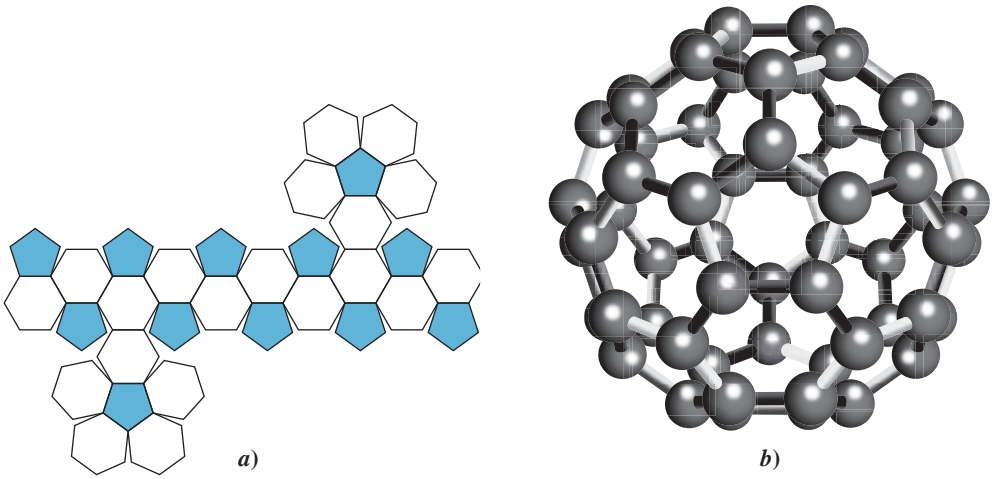
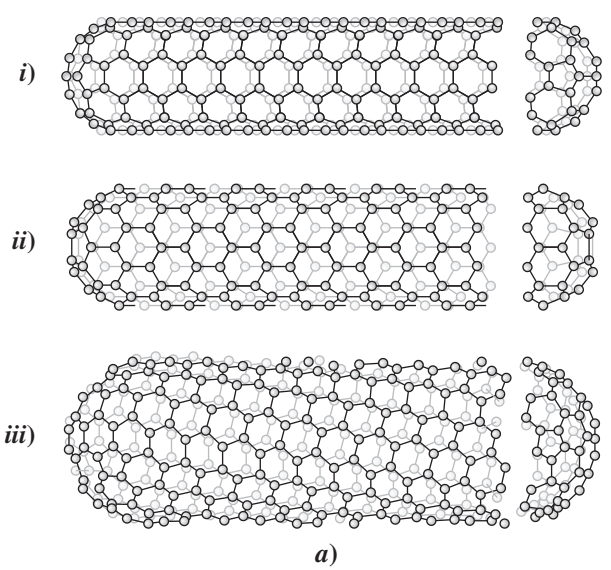


Figura 2-23 Estructura del buckybalon. *a*) Formación de un buckminsterfullereno a partir de 12 pentágonos regulares y 20 hexágonos regulares. *b*) Modelo de "barras y esferas" de la molécula de C60. (*iculig*/*Shutterstock.com*)



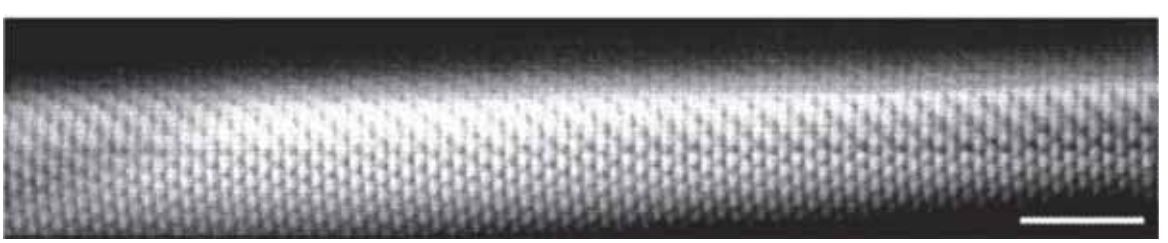


Figura 2-24 *a*) Diagramas esquemáticos de varias configuraciones de nanotubos de carbono amurallados de manera sencilla. i) nanotubo de sillón; ii) nanotubo en zigzag, iii) nanotubo que no es de sillón ni en zigzag, conocido como nanotubo quiral. (*Cortesía de la figura 6 de Carbon Nanomaterials, de Andrew R. Barron.*) *b*) Micrografía de barrido de efecto túnel de un nanotubo de carbono. [Reimpresa con permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 2004 18 de noviembre de 2004; 432(7015), "Electrical generation and absorption of phonons in carbon nanotubes", *LeRoy y col.*, derechos reservados 2004.]

estar amurallados de manera sencilla o de manera múltiple. Los nanotubos de carbono amurallados de manera múltiple consisten en muchos nanotubos concéntricos. Por lo general, los nanotubos son de 1 a 25 nm de diámetro y están en el orden de micrones (micras) de longitud. Además, si tienen configuraciones distintas muestran propiedades materiales diferentes. Por ejemplo, las propiedades eléctricas de los nanotubos dependen de la helicidad y del diámetro de los nanotubos. En la actualidad, los nanotubos se utilizan como refuerzo para endurecer y hacer más rígidos a los polímeros y como puntas para microscopios de fuerza atómica. También son considerados como posibles conductores de electricidad en dispositivos nanoelectrónicos avanzados. La figura 2-24*b*) es una imagen de un nanotubo de carbono amurallado de manera sencilla que se obtuvo utilizando un instrumento conocido como microscopio de barrido de efecto túnel (scanning tunneling microscope, STM). Un STM escanea una punta afilada sobre la superficie de una muestra. Se aplica un voltaje a la punta. Los electrones de la punta hacen un efecto de túnel o "se fugan" a la muestra cuando la punta está próxima a los átomos de la muestra. La corriente resultante es una función de la distancia de la punta a la muestra y las mediciones de la corriente pueden utilizarse para mapear la superficie de la muestra.

Resumen

- De manera similar a la composición, la estructura de un material tiene una influencia profunda sobre sus propiedades.
- La estructura de los materiales puede comprenderse a varios niveles: estructura atómica, arreglos atómicos de largo y corto alcances, nanoestructura, microestructura y macroestructura. Los ingenieros que realizan aplicaciones prácticas necesitan comprender la estructura a niveles micro y macro. Dado que los átomos y los arreglos atómicos constituyen los bloques de construcción de los materiales avanzados, es necesario comprender la estructura a nivel atómico. Existen muchos dispositivos recientes emergentes centrados en los sistemas microelectromecánicos (SMEM) y en la nanotecnología. Como resultado, también es muy importante para algunas aplicaciones comprender la estructura de los materiales a nanoescala.
- La estructura electrónica del átomo, la cual está descrita por un conjunto de cuatro números cuánticos, ayuda a determinar la naturaleza del enlace atómico y, por lo tanto, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.
- El enlace atómico es determinado de manera parcial por la forma en que interaccionan los electrones de valencia asociados con cada átomo. Los tipos de enlaces incluyen metálicos, covalentes, iónicos y de van der Waals. La mayoría de los materiales de ingeniería presentan un enlace mixto.
- Se forma un enlace metálico como resultado de que ciertos átomos de elementos con electronegatividad baja donan sus electrones de valencia y conducen a la formación de un "mar" de electrones. Los enlaces metálicos no son direccionales y son relativamente fuertes. Como resultado, la mayoría de los metales puros muestran un módulo de Young y una ductilidad altos. Son buenos conductores de calor y electricidad y reflejan la luz visible.
- Se forma un enlace covalente cuando se comparten electrones entre dos átomos. Los enlaces covalentes se encuentran en varios materiales poliméricos y cerámicos. Estos enlaces son fuertes y la mayoría de los materiales inorgánicos con enlaces covalentes exhiben niveles altos de resistencia, dureza y ductilidad limitada. La mayoría de los materiales plásticos basados en enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno muestran resistencias relativamente más bajas y buenos niveles de ductilidad. La mayoría de los materiales enlazados de manera covalente tienden a ser aislantes eléctricos relativamente buenos. Algunos materiales como el Si y el Ge son semiconductores.
- El enlace iónico que se encuentra en varias cerámicas se produce cuando un electrón es "donado" por un átomo electropositivo a un átomo electronegativo, lo que crea cationes con carga positiva y aniones con carga negativa. Al igual que en el caso de los materiales enlazados de manera covalente, estos materiales tienden a ser mecánicamente resistentes y duros, pero quebradizos. Los puntos de fusión de los materiales enlazados de manera iónica son relativamente altos. Por lo general, estos materiales son aislantes eléctricos. Sin embargo, en algunos casos su microestructura puede adecuarse de tal manera que se obtiene una conductividad iónica significativa.

- Se forman enlaces de van der Waals cuando los átomos o grupos de átomos tienen una carga eléctrica no simétrica, lo que permite el enlazamiento por medio de una atracción electrostática. La asimetría de la carga es resultado de los dipolos que se inducen o de los dipolos permanentes.
- La energía de unión está relacionada con la fuerza de los enlaces y es particularmente alta en los materiales enlazados de manera iónica y covalente. Con frecuencia, los materiales con una energía de unión alta tienen una alta temperatura de fusión, un módulo de elasticidad alto y un coeficiente bajo de expansión térmica.
- No todas las propiedades de los materiales son sensibles a la microestructura; el módulo de elasticidad es una de tales propiedades.
- El carbono existe como varios alótropos que incluyen el diamante, el grafito, el grafeno, el buckminsterfullereno y los nanotubos de carbono. Todos están conformados por carbono puro, pero sus propiedades materiales difieren de forma considerable debido a los distintos arreglos de los átomos que conforman sus estructuras.

Glosario

Alotropía Característica de un elemento que es capaz de existir en más de una estructura cristalina, lo cual depende de la temperatura y la presión.

Anión Ion con carga negativa que se produce cuando un átomo, por lo general de un no metal, acepta uno o más electrones.

Arreglos atómicos de corto alcance Arreglos atómicos superiores a una distancia de unos cuantos nm.

Arreglos atómicos de largo alcance Patrones tridimensionales repetitivos con los cuales se arreglan los átomos o iones en los materiales cristalinos.

Capa cuántica Conjunto de niveles de energía fijos a los que pertenecen los electrones.

Catión Ion con carga positiva que se produce cuando un átomo, por lo general de un metal, cede sus electrones de valencia.

Coeficiente de expansión térmica (CET) Cambio fraccional en la dimensión lineal de un material por grado de temperatura.

Composición Constitución química de un material.

Compuesto intermetálico Compuesto como el Al_3V, conformado por dos o más átomos metálicos.

Constante de Avogadro Número de átomos o moléculas en un mol. La constante de Avogadro es 6.022×10^{23} por mol.

Ductilidad Capacidad de los materiales para estirarse o doblarse de manera permanente sin romperse.

Electronegatividad Tendencia relativa de un átomo a aceptar un electrón y convertirse en un anión. Los átomos altamente electronegativos aceptan con facilidad electrones.

Electropositivo Tendencia de los átomos a donar electrones, por lo que son altamente reactivos.

Elementos de transición Conjunto de elementos con orbitales *d* y *f* parcialmente llenas. Por lo general, estos elementos exhiben una valencia múltiple y son útiles para aplicaciones electrónicas, magnéticas y ópticas.

Energía de unión Energía que se requiere para separar dos átomos de su espaciado de equilibrio a una distancia infinita. La energía de unión es una medida de la fuerza del enlace entre dos átomos.

Enlace covalente Enlace que se forma entre dos átomos cuando estos comparten sus electrones de valencia.

Enlace de hidrógeno Interacción de Keesom (un tipo de enlace de van der Waals) entre moléculas en las que está involucrado un átomo de hidrógeno (por ejemplo, los enlaces entre moléculas de agua).

Enlace de van der Waals Enlace secundario desarrollado entre átomos y moléculas como resultado de las interacciones entre los dipolos que son inducidos o permanentes.

Enlace iónico Enlace formado entre dos especies de átomos distintas cuando un átomo (el catión) dona sus electrones de valencia al segundo átomo (el anión). Una atracción electrostática une los iones entre sí.

Enlace metálico Atracción electrostática entre los electrones de valencia y las partes centrales de los iones con carga positiva.

Enlace secundario Enlaces débiles, como los enlaces de van der Waals, que por lo general unen moléculas entre sí.

Enlaces primarios Enlaces fuertes entre átomos adyacentes que resultan de la transferencia o compartición de los electrones de los orbitales externos.

Escala de longitud Distancia relativa o intervalo de distancias que se utiliza para describir la estructura, las propiedades o los fenómenos relacionados con los materiales.

Espaciado interatómico Espaciado de equilibrio entre los centros de dos átomos.

Espectroscopia Ciencia que analiza la emisión y absorción de la radiación electromagnética.

Estructura Descripción de los arreglos espaciales de los átomos o iones en un material.

Fuerzas de London Fuerzas de van der Waals que ocurren entre moléculas que no tienen momentos dipolares permanentes.

Interacciones de Debye Fuerzas de van der Waals que ocurren entre dos moléculas, con sólo una molécula que tiene un momento dipolar permanente.

Interacciones de Keesom Fuerzas de van der Waals que ocurren entre moléculas que tiene momentos dipolares permanentes.

Límite elástico Nivel de esfuerzo arriba del cual un material se deforma de manera permanente.

Macroestructura Estructura de un material a nivel macroscópico. La escala de longitud es de $\sim$>100,000 nm. Las características comunes incluyen la porosidad, los recubrimientos superficiales y las microfisuras internas o externas.

Masa atómica Masa de la constante de Avogadro de átomos, g/mol. Por lo general, es el número promedio de protones y neutrones que contiene el átomo. También llamada peso atómico.

Material amorfo Material que no tiene un orden de largo alcance en el arreglo de sus átomos (por ejemplo, los vidrios de sílice).

Materiales cristalinos Materiales en los que los átomos están arreglados de una manera periódica que exhibe un orden de largo alcance.

Microestructura Estructura de un material a una escala de longitud de $\sim$100 a 100,000 nm.

Módulo de elasticidad Pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica (E). También conocido como módulo de Young.

Moléculas polarizadas Moléculas que han desarrollado un momento dipolar en virtud de un campo eléctrico interno o externo.

Nanoescala Escala de longitud de 1-100 nm.

Nanoestructura Estructura de un material a nanoescala (escala de longitud de $\sim$1-100 nm).

Nanotecnología Conjunto emergente de tecnologías basadas en dispositivos, fenómenos y materiales a nanoescala.

Nucleón Protón o neutrón.

Número atómico Número de protones en un átomo.

Número cuántico acimutal Número cuántico que designa los distintos niveles de energía en las capas principales. También llamado número cuántico secundario.

Número cuántico del espín Número cuántico que indica el espín de un electrón.

Número cuántico magnético Número cuántico que describe los orbitales de cada número cuántico acimutal.

Números cuánticos Números que asignan los electrones de un átomo a los niveles de energía discretos. Los cuatro números cuánticos son el número cuántico principal n, el número cuántico acimutal l, el número cuántico magnético ml y el número cuántico del espín ms.

Principio de Aufbau Mecanismo gráfico que se utiliza para determinar el orden en el que son llenados por electrones los niveles de energía de las capas cuánticas.

Principio de exclusión de Pauli No más de dos electrones en un material pueden tener la misma energía.

Relación direccional Enlaces entre los átomos de materiales enlazados de manera covalente que forman ángulos específicos, lo cual depende del material.

Semiconductor III-V Semiconductor basado en los elementos de los grupos 3A y 5B (por ejemplo, el GaAs).

Semiconductor II-VI Semiconductor basado en los elementos de los grupos 2B y 6B (por ejemplo, el CdSe).

Sistemas microelectromecánicos (SMEM) Consisten en dispositivos miniaturizados, por lo general preparados por micromaquinación.

Temperatura de transición vítrea Temperatura por encima de la cual muchos polímeros y vidrios orgánicos dejan de comportarse como materiales quebradizos.

Unidad de masa atómica Masa de un átomo expresada como 1/12 de la masa de un átomo de carbono con 12 nucleones.

Valencia Número de electrones de un átomo que participan en el enlazamiento o reacciones químicas. Por lo general, la valencia es el número de electrones que se encuentra en los niveles de energía externos *s* y *p*.

Problemas

Sección 2-1 Estructura de materiales: introducción

2-1 ¿Qué significa el término *composición* de un material?

2-2 ¿Qué significa el término *estructura* de un material?

2-3 ¿Cuáles son los diferentes niveles de la estructura de un material?

2-4 ¿Por qué es importante considerar la estructura de un material cuando se diseñan o fabrican componentes de ingeniería?

2-5 ¿Cuál es la diferencia entre la microestructura y la macroestructura de un material?

Sección 2-2 Estructura del átomo

2-6 *a*) La pulgada cuadrada del papel aluminio que se utiliza para almacenar alimentos pesa aproximadamente 0.3 g. ¿Cuántos átomos de aluminio contiene una pulgada cuadrada de este papel?

b) Con base en las densidades y los pesos atómicos que se muestran en el apéndice A, calcule y compare el número de átomos por centímetro cúbico de i) el plomo y ii) el litio.

2-7 *a*) Utilizando la información del apéndice A, calcule el número de átomos de hierro que contiene una tonelada (1,000 kg).

b) Con base en la información del apéndice A, calcule el volumen en centímetros cúbicos que ocupa un mol de boro.

2-8 Para enchapar una parte de acero que tiene un área de superficie de 1,250 cm^2 con una capa de níquel de 0.005 cm de grosor: *a*) ¿cuántos átomos de níquel se requieren? *b*) ¿Cuántos moles de níquel se requieren?

Sección 2-3 Estructura electrónica del átomo

2-9 Defina el término electronegatividad.

2-10 Escriba la configuración electrónica de los siguientes elementos *a*) tungsteno, *b*) cobalto, *c*) circonio, *d*) uranio y *e*) aluminio.

2-11 Escriba la configuración electrónica del elemento Tc.

2-12 Suponiendo que se sigue el principio de Aufbau, ¿cuál es la configuración electrónica esperada del elemento con el número atómico Z = 116?

2-13 Utilizando el principio de Aufbau, ¿cuál es la configuración electrónica esperada de un elemento hipotético con el número atómico Z = 123?

2-14 Suponga que un elemento tiene una valencia de 2 y un número atómico de 27. Con base sólo en los números cuánticos, ¿cuántos electrones deben encontrarse en el nivel de energía 3*d*?

Sección 2-4 Tabla periódica

2-15 La tabla periódica de los elementos puede ayudar a racionalizar las tendencias de las propiedades de los elementos y compuestos con base en los elementos de distintos grupos. Busque en la bibliografía y obtenga los coeficientes de expansión térmica de los elementos del grupo 4B. Establezca una tendencia y vea si se correlaciona con las temperaturas de fusión y otras propiedades (por ejemplo, el espacio de banda) de estos elementos.

2-16 El enlazamiento del compuesto intermetálico Ni_3Al es predominantemente metálico. Explique por qué será un componente con poco, si no es que ningún, enlazamiento iónico. La electronegatividad del níquel es de alrededor de 1.8.

2-17 Grafique las temperaturas de fusión de los elementos que contienen las grupos 4A a 8-10 de la tabla periódica en función del número atómico (es decir, grafique las temperaturas de fusión del Ti al Ni, del Zr al Pd y del Hf al Pt). Explique estas relaciones, con base en el enlazamiento atómico y las energías de unión: *a*) a medida que aumenta el número en cada periodo de la tabla periódica, y *b*) a medida que aumenta el número atómico de cada grupo de la tabla periódica.

2-18 Grafique la temperatura de fusión de los elementos que contiene el grupo 1A de la tabla periódica en función del número atómico (es decir, grafique las temperaturas de fusión del Li al Cs). Explique esta relación con base en el enlace atómico y la energía de unión.

Sección 2-5 Enlace atómico

2-19 Compare y contraste los enlaces primarios metálicos y covalentes en términos de *a*) la naturaleza del enlace, *b*) la valencia de los átomos involucrados, y *c*) la ductilidad de los materiales enlazados de estas formas.

2-20 Diferencie los tres principios de enlazamiento de los sólidos. ¿Qué es el enlazamiento de van

der Waal? ¿Cuáles son las energías relativas de enlace de los diferentes mecanismos?

2-21 ¿Qué tipo de enlazamiento posee el KCl? Explique su razonamiento con base en la estructura electrónica y las propiedades electrónicas de cada elemento.

2-22 El fosfuro de aluminio (AlP) es un material compuesto semiconductor con enlace iónico y covalente. Calcule la fracción del enlace iónico.

2-23 Calcule la fracción del enlace iónico del MgO.

2-24 Calcule la fracción del enlace covalente de la sílice (SiO_2).

2-25 Calcule la fracción del enlace iónico por naturaleza del circonio (ZrO_2).

2-26 ¿Cuál es el tipo de enlace del diamante? ¿Sus propiedades se corresponden con la naturaleza del enlace?

2-27 ¿Cuáles son los mecanismos de enlace de los termoplásticos?

2-28 ¿Por qué los materiales con enlace covalente suelen ser menos densos que aquellos con enlaces iónicos o metálicos?

2-29 Las aplicaciones para moler y pulir emplean materiales como el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de silicio (Si_3N_4). Explique por qué se eligen estos materiales para estos usos.

2-30 Explique la función de las fuerzas de van der Waals en el plástico PVC.

2-31 Calcule la fracción del enlace iónico del carburo de silicio (SiC) y el nitruro de silicio (Si_3N_4).

2-32 Una forma particular de nitruro de boro (BN), conocida como nitruro de boro cúbico, es un material muy duro que se emplea en aplicaciones para moler. Calcule la fracción del enlace covalente de este material.

2-33 Una forma de nitruro de boro (BN), conocida como nitruro de boro hexagonal, se utiliza como lubricante sólido. Explique cómo es posible con base en un comparativo con el diamante y el grafito como dos formas de carbono.

2-34 ¿Existe alguna tendencia en el número de electrones en la capa externa de energía de los átomos o iones que han formado enlaces?

Sección 2-6 Energía de unión y espaciado interatómico

Sección 2-7 Las muchas formas del carbono: relaciones entre los arreglos de los átomos y las propiedades materiales

2-35 A fin de incrementar la temperatura de funcionamiento de un motor, se sugiere que algunos de los componentes de aluminio sean recubiertos con un material cerámico. ¿Qué tipo de problemas podría plantear esta cubierta? ¿Cómo se pueden resolver?

2-36 El aluminio y el silicio están lado a lado en la tabla periódica. Compare las temperaturas de fusión de los dos elementos y explique la diferencia en términos del enlazamiento atómico.

2-37 El titanio es más rígido que el aluminio, tiene un coeficiente de expansión térmica menor y una temperatura de fusión más alta que el aluminio. En la misma gráfica dibuje con cuidado y de manera esquemática las curvas razonablemente potenciales de ambos metales. Sea explícito para demostrar cómo se manifiestan las propiedades físicas en estas curvas.

2-38 ¿Se debe esperar que el hierro o el nitruro de silicio (SiN) tengan el mayor módulo de elasticidad? Explique su respuesta.

2-39 El berilio y el magnesio, ambos en el grupo 2A de la tabla periódica, son metales ligeros. ¿Cuál tiene el módulo de elasticidad mayor? Responda con base en la energía de unión, los radios atómicos y diagramas apropiados de la fuerza en función del espaciado interatómico.

2-40 El boro tiene un coeficiente de expansión térmica considerablemente menor que el del aluminio, aun cuando ambos elementos pertenecen al grupo 3B de la tabla periódica. Explique a qué se debe esta diferencia, considerando la energía de unión, el tamaño atómico y la depresión de energía.

2-41 ¿El coeficiente de expansión térmica del MgO es mayor que el del magnesio? Explique su respuesta.

2-42 ¿El coeficiente de expansión térmica del Al_2O_3 es mayor que el del aluminio? Explique su respuesta.

2-43 El aluminio y el silicio están lado a lado en la tabla periódica. ¿Cuál presenta el mayor módulo de elasticidad? Explique su respuesta.

2-44 Explique por qué se espera que el módulo de elasticidad de los polímeros plásticos simples, como el polietileno y el poliestireno, sea muy bajo en comparación con el de los metales y cerámicas.

2-45 El acero se recubre con una capa delgada de cerámica para protegerlo contra la corrosión. ¿Qué le sucede al recubrimiento cuando la temperatura del acero aumenta de forma significativa? Explique su respuesta.

2-46 ¿Por qué el módulo de elasticidad se considera una propiedad relativamente insensible a la estructura?

2-47 Una barra de aleación de aluminio de dos metros a temperatura ambiente (300K) se expone a una temperatura de 100°C ($\alpha = 23 \times 10^{-6}\,K^{-1}$). ¿Cuál será su longitud en estas condiciones?

2-48 Mencione por lo menos cuatro alótropos del carbono. ¿Por qué el grafito es conductor eléc-

trico y el diamante no si ambos son formas puras de carbono?

2-49 El enlace híbrido del carbono genera diferentes formas cristalinas. ¿A qué se debe ello si sólo cuenta con seis electrones? Explique su respuesta.

2-50 Describa la importancia tecnológica de cada uno de los alótropos de carbono que se presentaron en esta sección. ¿Cuál es la propiedad material de habilitación de cada alótropo?

Problemas de diseño

2-51 Desea introducir fibras cerámicas en una matriz metálica para producir un material compuesto que está sometido a fuerzas intensas y a grandes cambios de temperatura. ¿Qué parámetros de diseño podría considerar para asegurar que las fibras permanezcan intactas y proporcionen resistencia a la matriz? ¿Qué problemas podrían presentarse?

2-52 Los álabes de las turbinas que usan los motores de jet pueden fabricarse con materiales como las superaleaciones basadas en níquel. En principio, incluso, se pueden usar materiales cerámicos como el circonio y otras aleaciones basadas en aceros. En algunos casos, los álabes también pueden tener que recubrirse con una cubierta de barrera térmica para minimizar su exposición a las altas temperaturas. ¿Qué parámetros de diseño consideraría en la selección del material para los álabes de la turbina y para el recubrimiento que funcionarían exitosamente en un motor de turbina? Observe que distintas partes del motor están expuestas a diferentes temperaturas y que no todos los álabes están expuestos a temperaturas de operación relativamente altas. ¿Qué problemas podrían presentarse? Considere factores como la temperatura y la humedad ambiental en los que los álabes de la turbina deben funcionar.

2-53 Desea diseñar un material para fabricar un espejo para un telescopio que será lanzado al espacio. ¿Qué material consideraría sabiendo que las temperaturas en el espacio pueden cambiar de forma considerable? Recuerde que este material no debe expandirse o contraerse en absoluto, si es posible. También debe ser muy resistente, contar con la menor densidad posible y estar cubierto de manera que sirva como espejo.

2-54 Usted desea utilizar un material que pueda ser empleado para fabricar un sustrato de convertidor catalítico. El trabajo de este material será operar como portador de las nanopartículas de metales (como platino y paladio), que son los catalizadores reales. La principal condición que debe considerar es que este material catalizador de soporte debe ser capaz de soportar la calefacción y el enfriamiento cíclico constante a los que estará expuesto. (*Nota*: Los gases de los escapes de los automóviles alcanzan hasta 500°C, y el material será calentado a altas temperaturas y luego enfriado cuando el coche no se use.) ¿Qué tipos de materiales se pueden emplear para esta aplicación?

Problemas Knovel[mr]

K2-1
- Un disco de acero de 5 cm de grosor con un diámetro de 200 cm se ha cubierto (electrodepositado) con una capa de zinc de 0.00225 cm.
- ¿Cuál es el área de la cubierta en cm^2?
- ¿Cuántos kg de zinc se requieren? ¿En g?
- ¿Cuántos moles de zinc se requieren?
- Mencione algunos métodos distintos que se utilicen para la deposición del zinc en un sustrato de acero.
- ¿Qué método debe seleccionar en este caso?

El cuarzo, también conocido como sílice, cuya fórmula química es SiO_2, es el mineral que se encuentra en la arena. Este material es uno de los más abundantes en la Tierra. Si lo consideramos con base en su peso, el costo de la arena es muy económico; sin embargo, la sílice es el material que se refina para fabricar el silicio de grado electrónico, uno de los materiales más puros y casi perfectos que hay en el mundo. Las obleas de silicio son los sustratos de los microchips, como los que se encuentran en el procesador de su computadora. En tanto que una tonelada de arena podría costar sólo 10 dólares, una tonelada de microchips de silicio vale miles de millones de dólares.

La imagen anterior muestra un cristal de cuarzo. Un material cristalino en el que los átomos están ordenados en un arreglo regular repetitivo. Las facetas de los cristales reflejan el orden de largo alcance de los arreglos atómicos. (*Galyna Andrushko/ Shutterstock.com*)

CAPÍTULO

3

Arreglos atómicos e iónicos

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Qué es el silicio amorfo y en qué es distinto del silicio que se usa para fabricar chips de computadora?*
- *¿Qué son los cristales líquidos?*
- *Si fuera a empacar una caja cúbica con esferas de tamaño uniforme, ¿cuál es el empaquetamiento máximo posible?*
- *¿Cómo se puede calcular la densidad de los distintos materiales?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Visualizar la forma en la que los átomos se distribuyen en estructuras de cristal cúbicas centradas en la cara, centradas en el cuerpo y hexagonales compactas, y definir las relaciones espaciales entre los átomos en estas estructuras. Con base en los parámetros de una estructura de cristal distinta de las enumeradas, visualizar los arreglos atómicos
- Determinar las propiedades de los materiales cristalinos con base en su estructura de cristal (por ejemplo, la densidad de su masa y el tamaño relativo de los sitios intersticiales).
- Identificar los planos y direcciones compactos de las estructuras de cristal.
- Identificar y utilizar el índice de Miller de las direcciones y planos en un sistema coordinado de cristal.

Los arreglos de átomos e iones desempeñan una función importante para determinar la microestructura y las propiedades de un material. Los objetivos principales de este capítulo son:

a) aprender a clasificar los materiales con base en sus arreglos atómicos/iónicos y
b) describir los arreglos de los sólidos cristalinos con base en conceptos de la **red**, la **base** y la **estructura cristalina**.

En el caso de los sólidos cristalinos se ilustrarán los conceptos de redes de Bravais, celdas unitarias, direcciones cristalográficas y planos por medio del examen de los arreglos de átomos o iones en muchos materiales de importancia tecnológica, entre ellos, los metales (por ejemplo, Cu, Al, Fe, W, Mg), los semiconductores (por ejemplo, Si, Ge, GaAs), las cerámicas avanzadas (por ejemplo, ZrO_2, Al_2O_3, $BaTiO_3$, etc.), el diamante y muchos otros. También se desarrollará la nomenclatura necesaria que se utiliza para caracterizar los arreglos atómicos o iónicos en los materiales cristalinos. Se examinará el uso de la **difracción de rayos x** (DRX), de la **microscopía electrónica de transmisión** (MET) y de la **difracción de electrones**. Estas técnicas permiten explorar los arreglos de los átomos/iones en los distintos materiales. Se presentará una visión general de los tipos diferentes de **materiales amorfos** como el silicio amorfo, los vidrios metálicos, los polímeros y los vidrios inorgánicos.

En el capítulo 2 se hizo hincapié en cómo influye el enlace interatómico en ciertas propiedades de los materiales. En este capítulo el enfoque se centrará en la influencia de los arreglos atómicos y iónicos sobre las propiedades de los materiales de ingeniería. En particular, se concentrará en los arreglos "perfectos" de los átomos o iones en los sólidos cristalinos.

Los conceptos que se explican en este capítulo lo prepararán para comprender cómo las *desviaciones* de estos arreglos perfectos de los materiales cristalinos crean lo que se describe como defectos a nivel atómico. En este contexto el término **defecto** se refiere a la falta de perfección del orden atómico o iónico de los cristales y no a cualquier falla o cualidad de un material de ingeniería. En el capítulo 4 se describirán cómo estos defectos atómicos en realidad permiten el desarrollo de los aceros formables y resistentes que se usan en los automóviles y las construcciones, las aleaciones de aluminio para aviones, las celdas solares y los módulos fotovoltaicos para los satélites y muchas otras tecnologías.

3-1 Orden de corto alcance frente a orden de largo alcance

En los distintos estados de la materia se pueden definir cuatro tipos de arreglos (o distribuciones) atómicos o iónicos (figura 3-1).

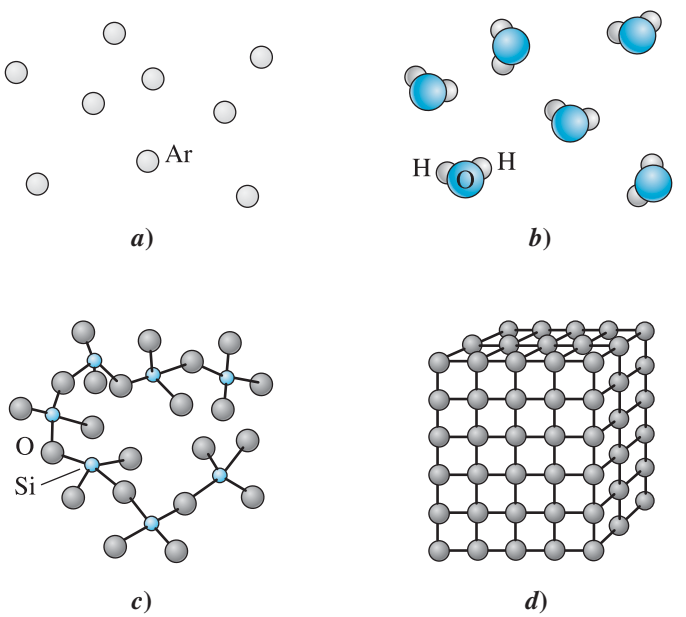


Figura 3-1 Niveles de arreglos atómicos en los materiales: *a*) Los gases monoatómicos inertes no tienen un ordenamiento regular de átomos. Algunos materiales, entre ellos el vapor de agua y *b*) el vidrio de silicato *c*) tienen orden de corto alcance. *d*) Los metales, las aleaciones, muchas cerámicas y algunos polímeros tienen un ordenamiento regular de átomos/iones que se extiende a lo largo del material.

Sin orden

En los gases monoatómicos, como el argón (Ar) o el plasma creado en una lámpara fluorescente, los átomos o iones no tienen un arreglo ordenado.

Orden de corto alcance

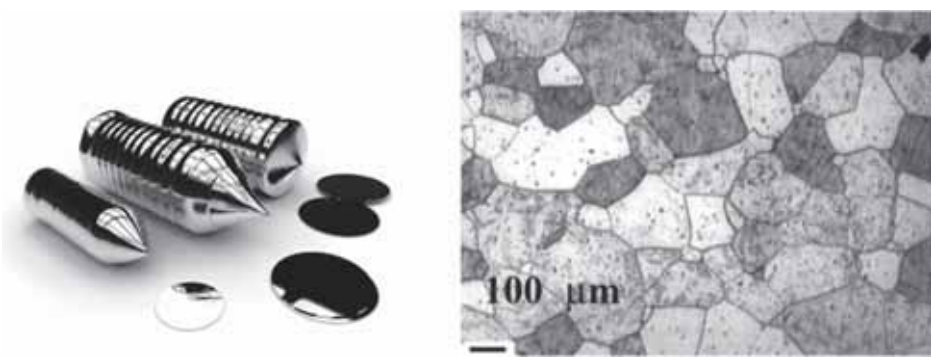
Un material muestra un **orden de corto alcance** (OCA) si el arreglo especial de los átomos sólo se extiende a los átomos vecinos más cercanos. Cada molécula de agua del vapor tiene un orden de corto alcance debido a los enlaces covalentes entre los átomos de hidrógeno y oxígeno; es decir, cada átomo de oxígeno se une a dos átomos de hidrógeno para formar un ángulo de 104.5° entre los enlaces. Sin embargo, no existe un orden de largo alcance, debido a que las moléculas de agua que conforman el vapor no tienen un arreglo especial con respecto a la posición de las demás.

Existe una situación similar en los materiales conocidos como vidrios inorgánicos. En la sección 2-5 se describió la estructura tetraédrica de la sílice que cumple el requerimiento de que cuatro iones oxígeno estén enlazados a cada ion silicio. Como se explicará más adelante, en el vidrio, las unidades tetraédricas individuales se unen entre sí de manera aleatoria. Estos tetraedros pueden compartir esquinas, aristas o caras. Por lo tanto, más allá de la unidad básica de un tetraedro de $(SiO_4)^{4-}$, los arreglos carecen de periodicidad. En contraste, en el cuarzo y otras formas de sílice cristalina, los tetraedros $(SiO_4)^{4-}$ están conectados en distintos arreglos periódicos.

Muchos polímeros también muestran arreglos atómicos de corto alcance que se parecen mucho a la estructura del vidrio de silicato. Analizaremos los polímeros en el capítulo 16.

Orden de largo alcance

La mayoría de los metales y las aleaciones, los semiconductores, las cerámicas y algunos polímeros tienen una estructura cristalina en la que los átomos o iones muestran un **orden de largo alcance** (OLA); el arreglo atómico especial se extiende sobre escalas de longitud mucho mayores de $\sim >10$ nm. Los átomos o iones que constituyen estos materiales forman un patrón repetitivo regular parecido a una cuadrícula en tres dimensiones. A estos materiales se les conoce como **materiales cristalinos**. Si uno de ellos solo consiste en un único cristal grande, se le conoce como *monocristal*. Los monocristales son útiles en muchas aplicaciones electrónicas y ópticas. Por ejemplo, los chips de computadora se fabrican a partir de silicio en la forma de monocristales grandes (de hasta 12 pulgadas de diámetro) [figura 3-2*a*)]. De manera similar, muchos dispositivos optoelectrónicos útiles se fabrican a partir de cristales de niobato de litio ($LiNbO_3$). Los monocristales también pueden fabricarse como películas delgadas y utilizarse para muchas aplicaciones electrónicas y otras. Ciertos tipos de álabes de turbinas también se fabrican a partir de monocristales de superaleaciones basadas en níquel. Un **material policristalino** está constituido por varios cristales más pequeños con diversas orientaciones en el espacio. A estos cristales más pequeños se les conoce como **granos**. A los límites entre los cristales, donde estos están en desalineamiento, se les llama **límites de grano**. La figura 3-2*b*) muestra la microestructura de un material de acero inoxidable



a) ***b)***

Figura 3-2 *a*) Fotografía de un monocristal de silicio. (*Petr Sobolev/iStock/Thinkstock*) *b*) Micrografía de un acero inoxidable policristalino que muestra los granos y los límites de los granos. (*Cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García*)

policristalino. Numerosos materiales cristalinos con los que se realizan aplicaciones de ingeniería son policristalinos (por ejemplo, los aceros que se utilizan en la construcción, las aleaciones de aluminio para aviones, etc.). En capítulos posteriores aprenderá que muchas propiedades de los materiales policristalinos dependen de las características físicas y químicas de los granos y de sus límites. Las propiedades de los materiales monocristalinos dependen de la composición química y de las direcciones específicas dentro del cristal (conocidas como direcciones cristalográficas). El orden de largo alcance en los materiales cristalinos puede detectarse y medirse por medio de técnicas como la **difracción de rayos x** o la **difracción de electrones** (vea la sección 3-9).

Los **cristales líquidos** (CL) son materiales poliméricos que tienen un tipo especial de orden. Los polímeros de cristal líquido se comportan como materiales amorfos (de modo parecido a los líquidos) en un estado. Cuando se los somete a un estímulo externo (como un campo eléctrico o un cambio en la temperatura), algunas moléculas de polímero experimentan una alineación y forman pequeñas regiones cristalinas, de ahí el nombre de "cristales líquidos". Estos materiales tienen muchas aplicaciones comerciales en la tecnología de las pantallas de cristal líquido (LCD).

3-2 Materiales amorfos

Cualquier material que sólo tiene un orden de corto alcance de átomos o iones es un **material amorfo**; es decir, es un material no cristalino. En general, se pretende que la mayoría de los materiales formen arreglos periódicos, dado que esta configuración maximiza su estabilidad termodinámica. Los materiales amorfos tienden a formarse cuando, por alguna u otra razón, la cinética del proceso por medio del cual se prepararon no permite la formación de arreglos periódicos. Los **vidrios**, los que por lo general se forman en sistemas cerámicos o poliméricos, son buenos ejemplos de materiales amorfos. De manera similar, ciertos tipos de geles poliméricos o coloidales, o materiales parecidos a geles, también se consideran amorfos. Con frecuencia, los materiales amorfos presentan una mezcla única de propiedades, dado que los átomos o iones no están ensamblados en sus arreglos "regulares" y periódicos. Observe que, con frecuencia, muchos materiales de ingeniería etiquetados como "amorfos" pueden contener una fracción cristalina.

De manera similar a otros vidrios inorgánicos, muchos plásticos también son amorfos. Durante el procesamiento, se enredan entre sí cadenas relativamente grandes de moléculas del polímero, de forma parecida al espagueti. Estas moléculas enredadas no se organizan en materiales cristalinos. Durante el procesamiento de botellas poliméricas de bebidas, se aplica un esfuerzo mecánico para fabricarlas [por ejemplo, para la fabricación de una botella estándar de bebida refrescante de 2 litros se usa tereftalato de polietileno (plástico PET)]. A este proceso se le conoce como **formación por soplado y estiramiento**. En realidad, los esfuerzos radiales (del soplado) y longitudinales (del estiramiento) durante la formación de la botella desenredan algunas de las cadenas de polímero y ocasionan una **cristalización inducida por esfuerzo**. La formación de cristales añade resistencia a las botellas de PET.

En comparación con los plásticos y los vidrios inorgánicos, los metales y las aleaciones tienden a formar materiales cristalinos con bastante facilidad. Como resultado, deben realizarse esfuerzos especiales para enfriar rápidamente los metales y aleaciones a fin de prevenir su cristalización: en el caso de algunas aleaciones se requiere una velocidad de enfriamiento de $>10^6$ °C/s para formar **vidrios metálicos**. A esta técnica de enfriamiento muy rápido de metales y aleaciones se le conoce como **solidificación rápida**. Otras composiciones especiales requieren de tasas de enfriamiento de solo decenas de grados por segundo o menos. Muchos vidrios metálicos tienen propiedades útiles e inusuales. En el capítulo 6 se explicarán las propiedades mecánicas de los vidrios metálicos.

3-3 Red, base, celdas unitarias y estructuras cristalinas

Un sólido común contiene un orden de 10^{23} átomos/cm^3. Para comunicar los arreglos espaciales de los átomos en un cristal, está claro que no es necesario o práctico especificar la posición de cada átomo. Se explicarán dos metodologías complementarias para describir de manera sencilla los arreglos

tridimensionales de los átomos en un cristal. Se hará referencia a ellas como el **concepto de red y base** y el concepto de **celda unitaria**. Estos conceptos están ligados a los principios de la **cristalografía**. En el capítulo 2 se explicó la estructura del átomo. Un átomo consiste en un núcleo de protones y neutrones rodeado por electrones, pero para el propósito de la descripción de los arreglos de átomos en un sólido, se visualizarán los átomos como esferas rígidas, muy parecidas a pelotas de ping-pong. Se comenzará con el concepto de red y base.

Una red es una colección de puntos llamados **puntos de red**, los cuales se arreglan en un patrón periódico, de tal manera que los entornos de cada punto en la red sean idénticos. Una red es una construcción puramente matemática cuya extensión es infinita. Una red puede ser uni, bi o tridimensional. En una dimensión solo existe una red posible: es una línea de puntos separados entre sí por una distancia igual, como se muestra en la figura 3-3*a*). A un grupo de uno o más átomos localizados en una manera en particular respecto uno de otro y asociados con cada punto de red, se le conoce como **motivo** o **base**. La base debe contener por lo menos un átomo, pero puede contener muchos átomos de uno o más tipos. En la figura 3-3*b*) se muestra la base de un átomo. Para obtener una **estructura cristalina** los átomos de la base se deben colocar en cada punto de red (es decir, la estructura cristalina = la red + la base), como se muestra en la figura 3-3*c*). En la figura 3-3*d*) se muestra un cristal unidimensional hipotético que tiene una base de dos átomos distintos. El átomo más grande se ubica en cada punto de red con el átomo más pequeño localizado a una distancia fija sobre el punto de red. Observe que no es necesario que uno de los átomos de la base esté ubicado en cada punto de red, como se muestra en la figura 3-3*e*). Las figuras 3-3*d*) y *e*) representan el mismo

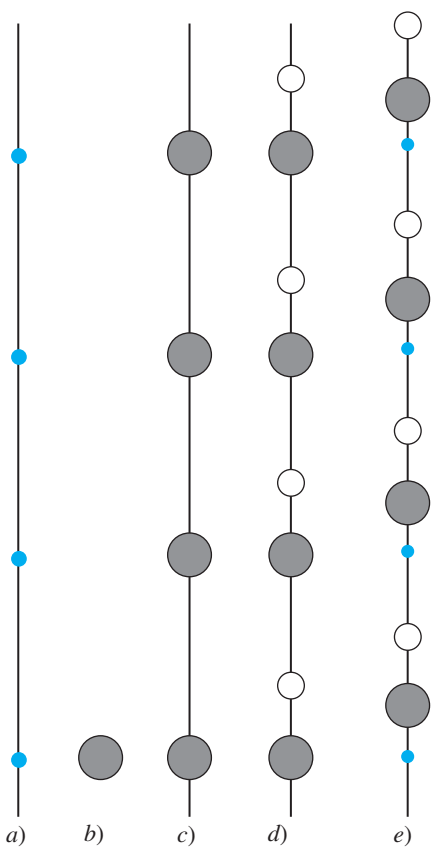


Figura 3-3 Red y base. *a*) Red unidimensional. Los puntos de red están separados por una distancia igual. *b*) Base de un átomo. *c*) Estructura cristalina que se forma colocando la base de *b*) sobre cada punto de red en *a*). *d*) Estructura cristalina que se forma colocando una base de dos átomos de distintos tipos en la red en *a*). *e*) El mismo cristal que el que se muestra en *d*); sin embargo, la base se ha desplazado en relación con cada punto de red.

cristal unidimensional; los átomos simplemente se desplazan de manera relativa entre sí. Tal desplazamiento no modifica los arreglos atómicos en el cristal.

Sólo existe una manera de arreglar los puntos en una dimensión para que cada punto tenga entornos idénticos: un arreglo de puntos separados por una distancia igual, como ya se explicó. Existen cinco maneras distintas de arreglar los puntos en dos dimensiones para que cada punto tenga entornos idénticos: por lo tanto, existen cinco redes bidimensionales. Sólo hay 14 maneras únicas de arreglar los puntos en tres dimensiones. A estos arreglos tridimensionales únicos de puntos de red se les conoce como **redes de Bravais**, nombradas así en honor de Auguste Bravais (1811-1863), quien fue uno de los primeros cristalógrafos franceses. En la figura 3-4 se muestran las 14 redes de Bravais. Como ya se enunció, cada red tiene una extensión infinita, por lo que se muestra una sola celda unitaria de cada red. La celda unitaria es la subdivisión de una red que mantiene las características generales de toda la red. Los puntos de red se localizan en las esquinas de las celdas unitarias y, en algunos casos, en sus caras o en el centro de ellas.

Las 14 redes de Bravais se agrupan en siete **sistemas cristalinos,** que se conocen como cúbico, tetragonal, ortorrómbico, romboédrico (al que también se le llama trigonal), hexagonal, monoclínico y triclínico. Observe que el sistema cristalino cúbico tiene las redes de Bravais cúbica sencilla (CS), cúbica centrada en la cara (CCCa) y cúbica centrada en el cuerpo (CCCu). Estos nombres describen el arreglo de los puntos de red en la celda unitaria. De manera similar, el sistema cristalino tetrago-

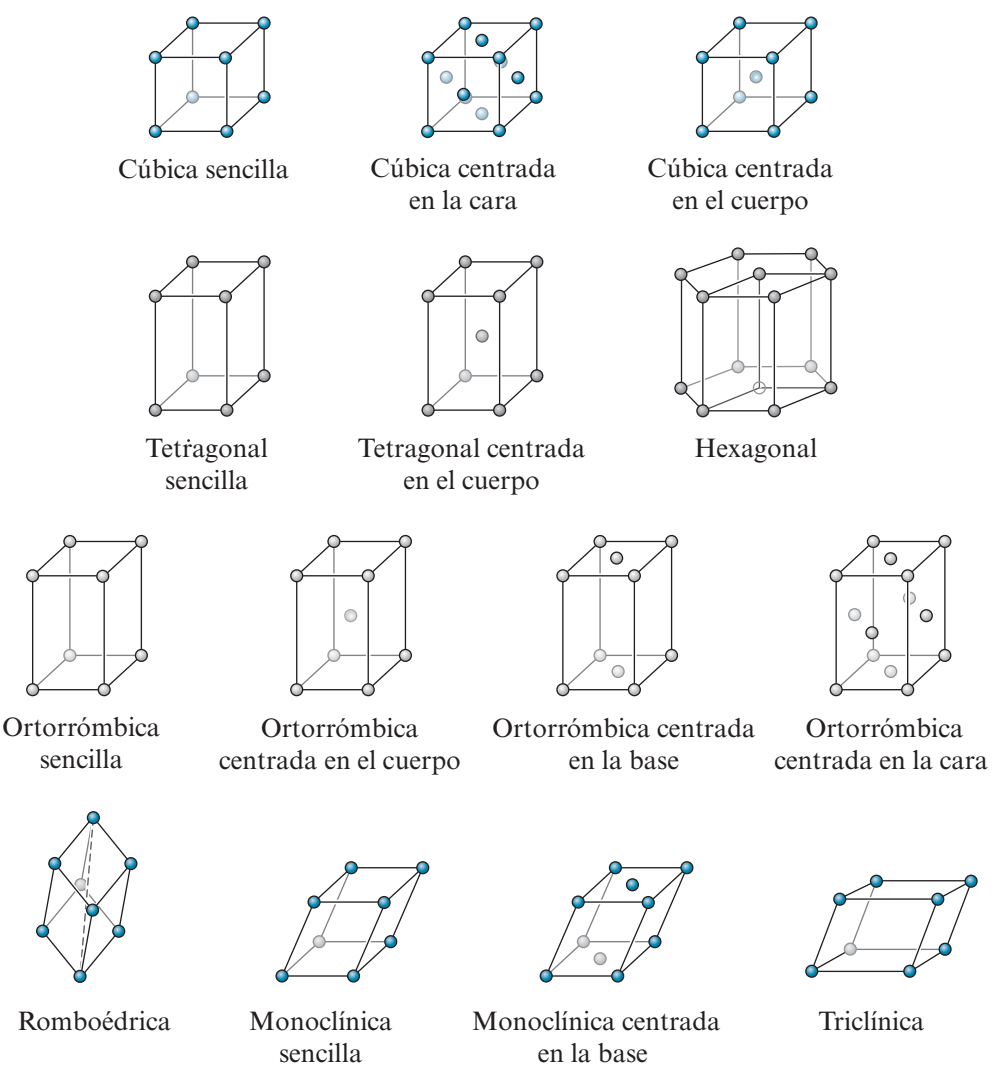


Figura 3-4 Los 14 tipos de redes de Bravais agrupados en los siete sistemas cristalinos. En las figuras 3-6 y 3-11 se muestra la celda unitaria real de un sistema hexagonal.

nal tiene las redes tetragonal sencilla y tetragonal centrada en el cuerpo. De nuevo, recuerde que el concepto de red es matemático y no menciona átomos, iones o moléculas. Solo cuando se asocia una base con una red se puede describir una estructura cristalina. Por ejemplo, si se toma la red cúbica centrada en la cara y se posiciona una base de un átomo sobre cada punto de red, se reproduce la estructura cristalina cúbica centrada en la cara.

Observe que aunque sólo existen 14 redes de Bravais, se puede tener un número infinito de bases. En la naturaleza se observan o pueden sintetizarse cientos de estructuras cristalinas distintas. Muchos materiales diferentes pueden tener la misma estructura cristalina. Por ejemplo, el cobre y el níquel tienen la estructura cristalina cúbica centrada en la cara en la que sólo un átomo está asociado con cada punto de red. En estructuras más complejas, en particular los materiales poliméricos, cerámicos y biológicos, se pueden asociar varios átomos con cada punto de red (es decir, la base es mayor de uno), para formar celdas unitarias muy complejas.

Celda unitaria

El objetivo es desarrollar una notación para modelar sólidos cristalinos que comuniquen de manera sencilla y con detalle cómo se arreglan los átomos en el espacio. El concepto de celda unitaria complementa el modelo de red y base para representar una estructura cristalina. Aunque las metodologías de los conceptos de red y base y de celda unitaria son un tanto distintos, el resultado final, la descripción de un cristal, es el mismo.

Nuestro objetivo al elegir una celda unitaria para una estructura cristalina es encontrar una unidad de repetición sencilla que, cuando se duplica y se traslada, reproduce toda la estructura cristalina. Por ejemplo, imagine el cristal como un rompecabezas tridimensional en el que cada pieza es exactamente la misma. Si se sabe a qué se parece una pieza del rompecabezas, se sabe a qué se parece todo el rompecabezas y no se tiene que armarlo todo para resolverlo. ¡Sólo se necesita una pieza! Para comprender el concepto de celda unitaria, se comienza con el cristal. La figura 3-5*a*) muestra un cristal bidimensional hipotético que consiste en átomos del mismo tipo.

Después, se adiciona una cuadrícula que imita la simetría de los arreglos de los átomos. Existe un número infinito de posibilidades para representar la cuadrícula, pero por convención, por lo regular se elige la más sencilla. En el caso del arreglo cuadrado de átomos que se muestra en la figura 3-5*a*) se elige una cuadrícula cuadrada, como la de la figura 3-5*b*). Después, se selecciona la unidad de repetición de la cuadrícula, la cual también se conoce como celda unitaria. Esta es la unidad que, cuando se duplica y traslada por medio de múltiples enteros de las longitudes axiales de la celda unitaria, recrea todo el cristal. En la figura 3-5*c*) se muestra una celda unitaria; observe que en cada una de ellas sólo hay un cuarto de un átomo en cada esquina en dos dimensiones. Siempre se dibujarán círculos llenos para representar los átomos, pero se comprende que sólo la fracción del átomo que está contenido dentro de la celda unitaria contribuye al número total de átomos en cada una de ellas. Por lo tanto, hay 1/4 de átomo/esquina* 4 esquinas = 1 átomo por celda unitaria, como se muestra en la figura 3-5*c*). También es importante observar que, si hay un átomo en una esquina de la celda unitaria, debe haber un átomo en cada esquina de la celda unitaria para mantener la simetría de traslación. Cada celda unitaria tiene su propio origen, como se muestra en la figura 3-5*c*).

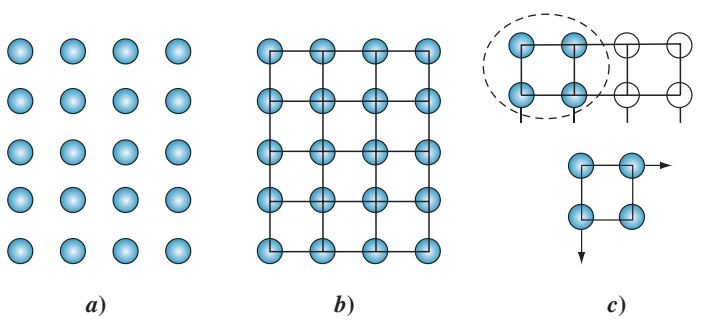


Figura 3-5 Celda unitaria. *a*) Cristal bidimensional. *b*) El cristal con una cuadrícula superpuesta que refleja la simetría del cristal. *c*) Unidad de repetición de la cuadrícula conocida como celda unitaria. Cada celda unitaria tiene su propio origen.

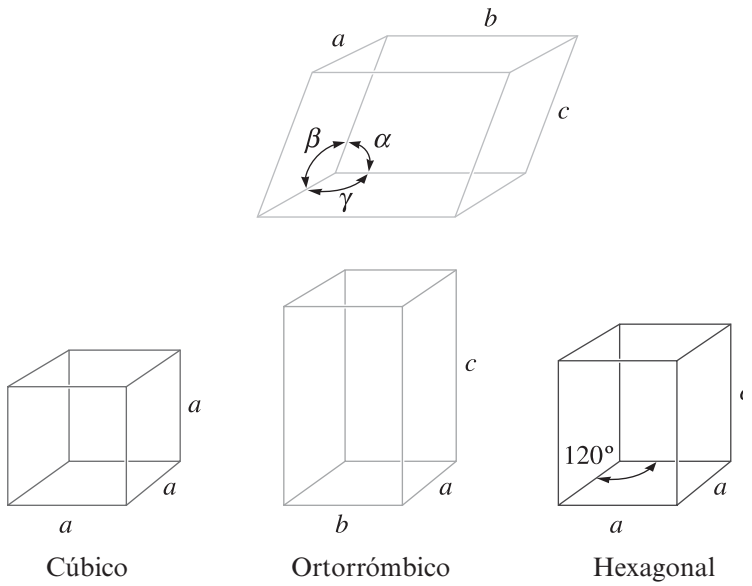


Figura 3-6 Definición de los parámetros de red y su uso en los sistemas cristalinos cúbico, ortorrómbico y hexagonal.

Parámetros de red y ángulos interaxiales

Los **parámetros de red** son las longitudes o dimensiones axiales de la celda unitaria que, por convención, se indican como a, b y c. Los ángulos entre las longitudes axiales, conocidos como ángulos interaxiales, se indican por medio de las letras griegas α, β y γ. Por convención, α es el ángulo entre las longitudes b y c, β es el ángulo entre las longitudes a y c y γ es el ángulo entre las longitudes a y b, como se muestra en la figura 3-6. (Observe que para cada combinación hay una letra a, b y c, ya sea que se escriban en letras griegas o romanas.)

En un sistema cúbico cristalino sólo se debe especificar la longitud de uno de los lados del cubo (en ocasiones se designa como a_0). Con frecuencia, la longitud se da en unidades de nanómetros (nm) o angstrom (Å), donde

$$1 \text{ nanómetro (nm)} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm} = 10 \text{ Å}$$
$$1 \text{ angstrom (Å)} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$$

En la tabla 3-1 se presentan los parámetros de red y los ángulos interaxiales de las celdas unitarias de los siete sistemas cristalinos.

Tabla 3-1 Características de los siete sistemas cristalinos

Estructura	Ejes	Ángulos entre los ejes	Volumen de la celda unitaria
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos son de 90°	a^3
Tegragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos son de 90°	a^2c
Ortorrómbica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son de 90°	abc
Hexagonal	$a = b \neq c$	El ángulo entre a y b es de 120°. Todos los ángulos son iguales y ninguno es de 90°	$0.866a^2c$
Romboédrica o trigonal	$a = b = c$	All angles are equal and none equals 90°	$a^3\sqrt{1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha}$
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de 90°. Un ángulo (β) no es de 90°	$abc \operatorname{sen} \beta$
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ninguno es de 90°	$abc\sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma}$

Para definir por completo una celda unitaria, se deben especificar los parámetros de red o razones entre las longitudes axiales, los ángulos interaxiales y las coordenadas atómicas. Cuando se especifican las coordenadas atómicas, todos los átomos se colocan en la celda unitaria. Las coordenadas se especifican como fracciones de las longitudes axiales. Por lo tanto, en el caso de la celda bidimensional que se representa en la figura 3-5*c*), la celda unitaria se especifica por completo por medio de la siguiente información:

Longitudes axiales: $a = b$
Ángulo interaxial: $\gamma = 90°$
Coordenada atómica: (0, 0)

De nuevo, sólo 1/4 del átomo en cada origen (0, 0) contribuye al número de átomos por celda unitaria; sin embargo, cada esquina actúa como un origen y contribuye 1/4 de átomo por esquina para un total de un átomo por celda unitaria. [¿Entiende por qué con un átomo en (0, 0) de cada celda unitaria sería repetitivo también dar las coordenadas (1, 0), (0, 1) y (1, 1)?]

De manera similar, una celda unitaria cúbica con un átomo en cada esquina se especifica por completo por medio de la siguiente información:

Longitudes axiales: $a = b = c$
Ángulos interaxiales: $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
Coordenada atómica: (0, 0, 0)

Ahora en tres dimensiones, cada esquina contribuye con 1/8 de átomo a cada una de las ocho esquinas para un total de un átomo por celda unitaria. Observe que el número de coordenadas atómicas que se requieren es igual al número de átomos por celda unitaria. Por ejemplo, si hay dos átomos por celda unitaria, con un átomo en las esquinas y un átomo en la posición centrada en el cuerpo, se requieren dos coordenadas atómicas: (0, 0, 0) y (1/2, 1/2, 1/2).

Número de átomos por celda unitaria

Cada celda unitaria contiene un número específico de puntos de red. Cuando se cuenta el número de puntos de red que pertenecen a cada celda unitaria, se debe reconocer que, al igual que los átomos, los puntos de red pueden estar compartidos por más de una celda unitaria. Un punto de red en una esquina de una celda unitaria está compartido por siete celdas unitarias adyacentes; sólo un octavo de cada esquina pertenece a una celda en particular. Por lo tanto, el número de puntos de red de todas las posiciones en las esquinas en una celda unitaria es:

$$\left(\frac{1/8 \text{ punto de red}}{\text{esquina}}\right)\left(\frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celdas}}\right) = \frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}}$$

Las esquinas contribuyen con 1/8 de un punto, las caras con 1/2 y las posiciones centradas en el cuerpo, con 1 punto [figura 3-7*a*)].

El número de átomos por celda unitaria es el producto del número de átomos por punto de red y el número de puntos de red por celda unitaria. En la figura 3-7*b*) se muestran las estructuras de las celdas unitarias cúbicas sencilla (CS), cúbicas centradas en el cuerpo (CCCu) y cúbicas centradas en la cara (CCCa).

Radio atómico frente a parámetro de red

Las direcciones en la celda unitaria a lo largo de las cuales los átomos están en contacto continuo se llaman **direcciones compactas**. En las estructuras sencillas, particularmente en aquellas con sólo un átomo por punto de red, se utilizan estas direcciones para calcular la relación entre el tamaño aparente del átomo y el tamaño de la celda unitaria. Cuando se determina de manera geométrica la longitud de la dirección con respecto a los parámetros de red y después se adiciona el número de **radios atómicos** a lo largo de esta dirección, se puede determinar la relación deseada.

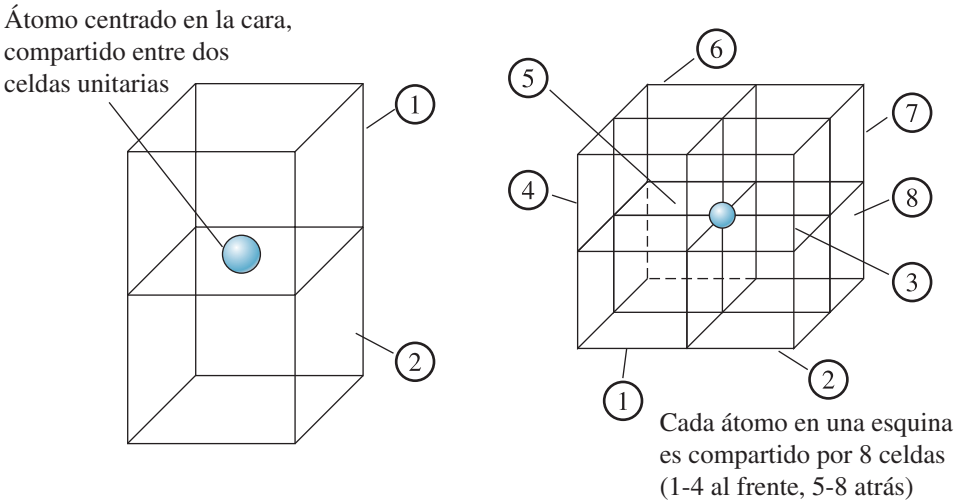


Figura 3-7 *a*) Ilustración que muestra la compartición de los átomos de las caras y las esquinas. *b*) Modelos de celdas unitarias cúbicas sencillas (CS), cúbicas centradas en el cuerpo (CCCu) y cúbicas centradas en la cara (CCCa), suponiendo sólo un átomo por punto de red.

Ejemplo 3-1 *Determinación del número de puntos de red en los sistemas cristalinos cúbicos*

Determine el número de puntos de red por celda en los sistemas cristalinos cúbicos. Si sólo hay un átomo localizado en cada punto de red, calcule el número de átomos por celda unitaria.

SOLUCIÓN

En la celda unitaria CS, los puntos de red sólo están localizados en las esquinas del cubo:

$$\frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ punto de red}}{\text{esquina}} = \frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}}$$

En las celdas unitarias CCCu, los puntos de red se localizan en las esquinas y en el centro del cubo:

$$\frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ punto de red}}{\text{esquina}} + \frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1 \text{ punto de red}}{\text{centrado en el cuerpo}} = \frac{2 \text{ puntos de red}}{\text{celda unitaria}}$$

En las celdas unitarias CCCa, los puntos de red se localizan en las esquinas y en las caras del cubo:

$$\frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ punto de red}}{\text{esquina}} + \frac{6 \text{ centrado en la cara}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/2 \text{ punto de red}}{\text{centrado en la cara}} = \frac{4 \text{ puntos de red}}{\text{celda unitaria}}$$

Dado que se supone que sólo se localizan un átomo en cada punto de red, el número de átomos por celda unitaria sería de 1, 2 y 4 en l3as celdas unitarias cúbicas sencillas, cúbicas centradas en el cuerpo y cúbicas centradas en la cara, respectivamente.

Ejemplo 3-2 *Estructura del cloruro de cesio*

Por lo general, a las estructuras cristalinas se les asignan los nombres de un elemento o compuesto representativo que ellas contienen. El cloruro de cesio (CsCl) es un compuesto iónico cristalino. En la figura 3-8 se muestra una celda unitaria de la estructura cristalina del CsCl. La celda unitaria es cúbica. Los aniones cloruro se localizan en las esquinas de la celda unitaria y el catión cesio lo hace en la posición centrada en el cuerpo de cada celda unitaria. Describa esta estructura como una red y base y también defina la celda unitaria del cloruro de cesio.

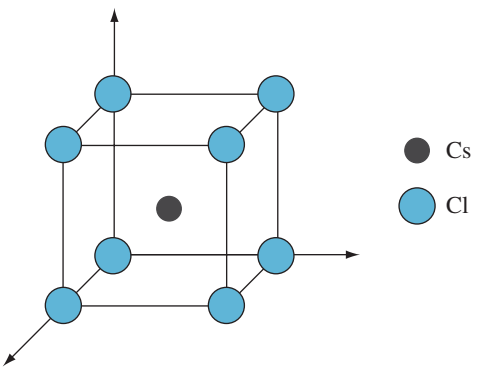


Figura 3-8 Estructura cristalina del CsCl. *Nota*: Los tamaños de los iones no están a escala.

SOLUCIÓN

La celda unitaria es cúbica; por lo tanto, la red es CS, CCCa o CCCu. No hay átomos localizados en las posiciones centradas en la cara; por ello, la red es CS o CCCu. Cada anión Cl está rodeado por ocho cationes Cs en las posiciones centradas en el cuerpo de las celdas unitarias adyacentes. Cada catión Cs está rodeado por ocho aniones Cl en las esquinas de la celda unitaria. Por lo tanto, la esquina y las posiciones centradas en el cuerpo no tienen entornos idénticos, por lo que no pueden ser puntos de red. La red debe ser cúbica sencilla.

La red cúbica sencilla sólo tiene puntos de red en las esquinas de la celda unitaria. La estructura cristalina del cloruro de cesio puede describirse como una red cúbica sencilla con una base de dos átomos, Cl (0, 0, 0) y Cs (1/2, 1/2, 1/2). Observe que las coordenadas atómicas se presentan como fracciones de las longitudes axiales, las cuales son iguales en el caso de una estructura cristalina cúbica. El átomo base de Cl (0, 0, 0) colocado en cada punto de red (es decir, cada esquina de la celda unitaria) explica por completo cada átomo de Cl en la estructura. El átomo base de Cs (1/2, 1/2, 1/2) que se localiza en la posición centrada en el cuerpo con respecto a cada punto de red, explica por completo cada átomo de Cs en la estructura.

Por lo tanto, hay dos átomos por celda unitaria en el CsCl:

$$\frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{2 \text{ iones}}{\text{punto de red}} = \frac{2 \text{ iones}}{\text{celda unitaria}}$$

Para definir por completo una celda unitaria, se deben especificar los parámetros de red o razones entre las longitudes axiales, los ángulos interaxiales y las coordenadas atómicas. La celda unitaria del CsCl es cúbica; por lo tanto

$$\text{Longitudes axiales: } a = b = c$$
$$\text{Ángulos interaxiales: } \alpha = \beta = \gamma = 90°$$

Los aniones Cl se localizan en las esquinas de la celda unitaria, mientras que los cationes Cs se ubican en las posiciones centradas en el cuerpo. Por lo tanto,

$$\text{Coordenadas: Cl (0, 0, 0) y Cs (1/2, 1/2, 1/2)}$$

Al contar los iones por celda unitaria,

$$\frac{8 \text{ esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ Cl ion}}{\text{esquina}} + \frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1 \text{ Cs ion}}{\text{centrado en el cuerpo}} = \frac{2 \text{ iones}}{\text{celda unitaria}}$$

Como se espera, el número de átomos por celda unitaria es el mismo sin que importe el método empleado para contarlos.

Ejemplo 3-3 *Determinación de la relación entre el radio atómico y los parámetros de red*

Determine la relación entre el radio atómico y el parámetro de red en las estructuras CS, CCCu y CCCa.

SOLUCIÓN

En la figura 3-9 se observa que los átomos se tocan a lo largo de la arista del cubo en las estructuras CS. Los átomos en las esquinas están centrados en las esquinas del cubo, por lo que

$$a_0 = 2r \tag{3-1}$$

En una estructura CCCu, los átomos se tocan a lo largo de la diagonal del cuerpo, la cual es de $\sqrt{3}a_0$ de longitud. Hay dos radios atómicos del átomo centrado y un radio atómico de cada uno de los átomos en las esquinas en la diagonal del cuerpo, por lo que

$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{3}} \tag{3-2}$$

En una estructura CCCa, los átomos se tocan a lo largo de la diagonal de la cara del cubo, la cual tiene una longitud de $\sqrt{2}a_0$. Existen cuatro radios atómicos a lo largo de esta longitud: dos radios del átomo centrado en la cara y un radio en cada esquina, por lo que

$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{2}} \tag{3-3}$$

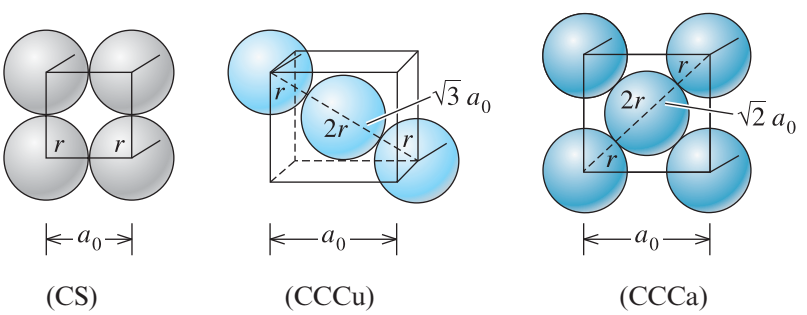
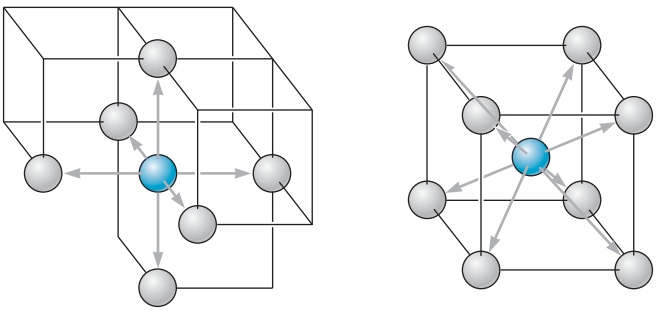


Figura 3-9 Relaciones entre el radio atómico y el parámetro de red en los sistemas cúbicos (del ejemplo 3-3).

Red hexagonal y celda unitaria

La imagen de la red hexagonal en la figura 3-4 refleja la simetría subyacente a la red, pero a diferencia de las demás imágenes de la figura 3-4, no representa la celda unitaria de la red. En la figura 3-6 se muestra la celda unitaria hexagonal. En la



a) *b*)

Figura 3-10 Ilustración del número de coordinación en las celdas unitarias *a*) CS y *b*) CCCu. Seis átomos tocan cada átomo en la celda unitaria CS, mientras que ocho átomos tocan cada átomo en la celda unitaria CCCu.

figura 3-4 puede encontrar la celda unitaria hexagonal. Los parámetros de red de la celda unitaria hexagonal son

$$\text{Longitudes axiales: } a = b \neq c$$
$$\text{Ángulos interaxiales: } \alpha = \beta = 90°,\ \gamma = 120°$$

Cuando los átomos de la celda unitaria sólo están localizados en las esquinas, la coordenada atómica es (0, 0, 0).

Número de coordinación

El **número de coordinación** es el número de átomos que tocan un átomo en particular, o el número de los vecinos más cercanos a él. Esta es una indicación del grado de precisión y eficiencia con que están empaquetados los átomos entre sí. En el caso de sólidos iónicos, el número de coordinación de los cationes se define como el número de aniones más cercanos. El número de coordinación de los aniones es el número de cationes más cercanos. En la sección 3-7 se explicarán las estructuras cristalinas de los distintos sólidos iónicos y otros materiales.

En las estructuras cúbicas que sólo contienen un átomo por punto de red, los átomos tienen un número de coordinación relacionado con la estructura de red. Por inspección de las celdas unitarias de la figura 3-10, se puede observar que cada átomo de la estructura CS tiene un número de coordinación de seis, mientras que cada átomo de la estructura CCCu tiene ocho vecinos más cercanos. En la sección 3-5 se demostrará que cada átomo de la estructura CCCa tiene un número de coordinación de 12, que es el máximo que se puede alcanzar.

Factor de empaquetamiento

El **factor de empaquetamiento** o **fracción de empaquetamiento atómico** es la fracción del espacio que ocupan los átomos, suponiendo que son esferas duras. La expresión general del factor de empaquetamiento es:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(\text{número de átomos/celda})(\text{volumen de cada átomo})}{\text{volumen de la celda unitaria}} \tag{3-4}$$

El ejemplo 3-4 ilustra cómo se calcula el factor de empaquetamiento de una celda unitaria CCCa.

Ejemplo 3-4 *Cálculo del factor de empaquetamiento*

Calcule el factor de empaquetamiento de la celda unitaria CCCa.

SOLUCIÓN

En la celda unitaria CCCa hay cuatro puntos de red por celda; si hay un átomo por punto de red, también hay cuatro átomos por celda. El volumen de un átomo es $4\pi r^3/3$ y el volumen de la celda unitaria es a_0^3, donde r es el radio del átomo y a_0 es el parámetro de red

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(4 \text{ átomos/celda})\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{a_0^3}$$

Dado que en el caso de las celdas unitarias CCCa, $a_0 = 4r/\sqrt{2}$:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(4)\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{(4r/\sqrt{2})^3} = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \cong 0.74$$

El factor de empaquetamiento de $\pi/\sqrt{18} \cong 0.74$ en la celda unitaria CCCa es el empaquetamiento más eficiente posible. Las celdas CCCu tienen un factor de empaquetamiento de 0.68 y las celdas CS tienen un factor de empaquetamiento de 0.52. Observe que el factor de empaquetamiento es independiente del radio de los átomos, siempre que se suponga que todos los átomos tienen un radio fijo. Lo que esto significa es que no importa si los átomos se empacan en celdas unitarias o en balones de basquetbol o en pelotas de tenis de mesa en una caja cúbica. ¡El factor de empaquetamiento máximo alcanzable es $\pi/\sqrt{18}$. A este concepto de geometría discreta se le conoce como **conjetura de Kepler**. Johannes Kepler propuso esta conjetura en 1611 y se mantuvo como tal y sin comprobar hasta 1998, cuando Thomas C. Hales demostró que en realidad es verdadera.

El arreglo CCCa representa una **estructura compacta** (EC) (es decir, la fracción de empaquetamiento es las más alta posible con átomos de un tamaño). Las estructuras CS y CCCu son relativamente abiertas. En la siguiente sección se verá que es posible que una estructura hexagonal tenga la misma eficiencia de empaquetamiento que la estructura CCCa. A esta estructura se le conoce como estructura compacta hexagonal (CH). Los metales con sólo enlazamiento metálico están empaquetados lo más eficientemente posible. Los metales con enlace mixto, como el hierro, pueden tener celdas unitarias menores al factor de empaquetamiento máximo. Por lo general no se encuentran metales o aleaciones de ingeniería que tengan estructura CS.

Densidad

La **densidad** teórica de un material puede calcularse utilizando las propiedades de la estructura cristalina. La fórmula general es

$$\text{Densidad } \rho = \frac{(\text{número de átomos/celda})(\text{masa atómica})}{(\text{volumen de la celda unitaria})(\text{constante de Avogadro})} \qquad (3\text{-}5)$$

Si un material es iónico y consiste en distintos tipos de átomos o iones, tendrá que modificarse esta fórmula para que refleje estas diferencias. El ejemplo 3-5 ilustra cómo se determina la densidad del hierro CCCu.

Ejemplo 3-5 *Determinación de la densidad del hierro CCCu*

Determine la densidad del hierro CCCu, el cual tienen un parámetro de red de 0.2866 nm.

SOLUCIÓN

En una celda unitaria de hierro CCCu hay dos átomos.

$$\text{Volumen de la celda unitaria} = (2.866 \times 10^{-8}\ \text{cm})^3 = 2.354 \times 10^{-23}\ \text{cm}^3$$

$$\text{Densidad } \rho = \frac{(\text{número de átomos/celda})(\text{masa atómica})}{(\text{volumen de la celda unitaria})(\text{constante de Avogadro})}$$

$$\rho = \frac{(2\ \text{átomos/celda})(55.847\text{g/mol})}{(2.354 \times 10^{-23}\ \text{cm}^3\ \text{/celda})(6.022 \times 10^{23}\ \text{átomos/mol})} = 7.879\ \text{g/cm}^3$$

La densidad medida es de 7.870 g/cm^3. La ligera discrepancia entre las densidades teórica y medida es consecuencia de los defectos del material. Como ya se mencionó, el término "defecto" en este contexto se refiere a las imperfecciones con respecto al arreglo atómico.

Estructura compacta hexagonal

En la figura 3-11 se muestra la estructura compacta hexagonal (CH). La red es hexagonal con una base de dos átomos del mismo tipo: uno localizado en (0, 0, 0) y otro en (2/3, 1/3, 1/2). (Estas coordenadas siempre son fracciones de las longitudes axiales a, b y c incluso si estas no son iguales.) La red hexagonal tiene un punto de red por celda unitaria que se localiza en las esquinas de la celda unitaria. En la estructura CH, dos átomos están asociados con cada punto de red; por lo tanto, hay dos átomos por celda unitaria.

Una representación igualmente válida de la estructura cristalina CH es una red hexagonal con una base de dos átomos del mismo tipo: uno localizado en (0, 0, 0) y otro en (1/3, 2/3, 1/2). Las coordenadas (2/3, 1/3, 1/2) y (1/3, 2/3, 1/2) son equivalentes, lo que significa que no pueden distinguirse entre sí.

En los metales con una estructura CH ideal los ejes a_0 y c_0 están relacionados por la razón $c_0/a_0 = \sqrt{8/3} = 1.633$. Sin embargo, la mayoría de los metales CH tienen razones c_0/a_0 que difieren ligeramente del valor ideal debido al enlace mixto. En razón de que la estructura CH, como la estructura CCCa, tienen el factor de empaquetamiento más eficiente de 0.74 y un número de coordinación de 12, varios metales poseen esta estructura. La tabla 3-2 resume las características de las estructuras cristalinas de algunos metales.

Las estructuras de los metales enlazados de manera iónica pueden verse como formados por medio del empaquetamiento (cúbico o hexagonal) de los aniones. Los cationes entran en los sitios u orificios intersticiales que quedan después del empaquetamiento de los aniones. La sección 3-7 explica este tema con mayor detalle.

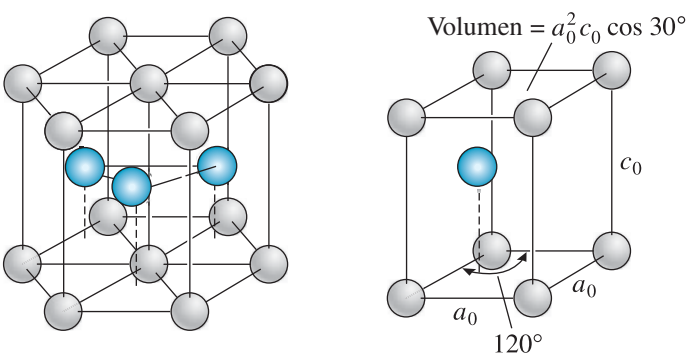


Figura 3-11 Estructura compacta hexagonal (CH) (izquierda) y su celda unitaria.

TABLA 3-2 Características de las estructuras cristalinas de algunos metales a temperatura ambiente

Estructura	a_0 frente a r	Átomos por celda	Número de coordinación	Factor de empaquetamiento	Ejemplos
Cúbica sencilla (CS)	$a_0 = 2r$	1	6	0.52	Polonio (Po), α-Mo
Cúbica centrada en el cuerpo (CCCu)	$a_0 = 4r/\sqrt{3}$	2	8	0.68	Fe, W, Mo, Nb, Ta, K, Na, V, Cr
Cúbica centrada en la cara (CCCa)	$a_0 = 4r/\sqrt{2}$	4	12	0.74	Cu, Au, Pt, Ag, Pb, Ni
Estructura compacta hexagonal (CH)	$a_0 = 2r$ $c_0 \approx 1.633a_0$	2	12	0.74	Ti, Mg, Zn, Be, Co, Zr, Cd

3-4 Transformaciones alotrópicas o polimórficas

A los materiales con más de una estructura cristalina se les llama alotrópicos o polimórficos. Por lo general, el término **alotropía** se reserva para este comportamiento de los elementos puros, mientras que el vocablo **polimorfismo** se utiliza para designar los compuestos. En el capítulo 2 se explicaron los alótropos del carbono. Algunos metales, como el hierro y el titanio, tienen más de una estructura cristalina. A temperatura ambiente, el hierro tiene la estructura CCCu, pero a temperaturas más altas esta se transforma en una estructura CCCa. Estas transformaciones generan cambios en las propiedades de los materiales y forman la base del tratamiento térmico de los aceros y muchas otras aleaciones.

Muchos materiales cerámicos, como la sílice (SiO_2) y la zirconia (ZrO_2), también son polimórficos. La transformación puede estar acompañada por un cambio de volumen durante el calentamiento o el enfriamiento; si no se controla de manera apropiada, este cambio de volumen provoca que el material cerámico se resquebraje y falle. Por ejemplo, en el caso de la zirconia (ZrO_2), la forma más estable a temperatura ambiente (~25°C) es monoclínica. A medida que se incrementa la temperatura, más estructuras cristalinas simétricas alcanzan la estabilidad. A 1,170°C, la zirconia monoclínica se transforma en una estructura tetragonal. La forma tetragonal es estable hasta 2,370 °C. A esa temperatura, la zirconia se transforma en una forma cúbica. La forma cúbica permanece estable de 2,370°C hasta la temperatura de fusión, que es de 2,680°C. La zirconia también puede tener la forma ortorrómbica cuando se aplican presiones altas.

Por lo general, los componentes cerámicos fabricados a partir de zirconia pura se fracturan a medida que disminuye la temperatura y la zirconia se transforma de la forma tetragonal en la monoclínica debido a la expansión del volumen (el cambio de fase cúbica a tetragonal no provoca un cambio significativo de volumen). Como resultado, los polimorfos puros monoclínico y tetragonal de la zirconia no se utilizan. En su lugar, los científicos e ingenieros de materiales han comprobado que la adición de dopantes como la itria (Y_2O_3) permite estabilizar la fase cúbica de la zirconia, incluso a temperatura ambiente. La zirconia estabilizada por la itria (ZEI) contiene hasta 8% mol de Y_2O_3. Las formulaciones de la zirconia estabilizada se utilizan en muchas aplicaciones, como recubrimientos de barrera térmicos (RBT) para álabes de turbinas y electrolitos para sensores de oxígeno y celdas de combustible de óxido sólido. En la actualidad prácticamente cada automóvil utiliza un sensor de oxígeno que se fabrica con base en compuestos de zirconia estabilizada, la cual tiene una apariencia similar al diamante, por lo que se emplea en joyería como una alternativa económica. El ejemplo 3-6 ilustra cómo calcular los cambios de volumen de los polimorfos de la zirconia.

Ejemplo 3-6 *Cálculo de los cambios de volumen de los polimorfos de la zirconia*

Calcule el cambio porcentual de volumen a medida que la zirconia se transforma de una estructura tetragonal en una monoclínica. Las constantes de red de las celdas unitarias monoclínicas son: $a = 5.156$, $b = 5.191$ y $c = 5.304$ Å, respectivamente. El ángulo β de la celda unitaria monoclínica es de 98.9°. Las constantes de red de la celda unitaria tetragonal son $a = 5.094$ y $c = 5.304$ Å . ¿La zirconia se expande o se contrae durante esta transformación? ¿Cuál es la implicación de esta transformación sobre las propiedades mecánicas de las cerámicas de zirconia?

SOLUCIÓN

A partir de la tabla 3-1, el volumen de una celda unitaria tetragonal está dado por

$$V = a^2c = (5.094)^2(5.304) = 137.63 \text{ Å}^3$$

y el volumen de una celda unitaria monoclínica está dado por

$$V = abc \operatorname{sen} \beta = (5.156)(5.191)(5.304) \operatorname{sen}(98.9°) = 140.25 \text{ Å}$$

Por lo tanto, hay una expansión de la celda unitaria a medida que la ZrO_2 se transforma de una forma tetragonal en una monoclínica.

$$\text{Cambio porcentual de volumen} = (\text{volumen final} - \text{volumen inicial})/(\text{volumen inicial}) * 100 = (140.25 - 137.63\ \text{Å}^3)/(137.63\ \text{Å}^3) * 100 = 1.9\%$$

La mayoría de las cerámicas son muy quebradizas y no pueden soportar un cambio de volumen mayor de 0.1% (en los capítulos 6, 7 y 8 se explicará el comportamiento mecánico de los materiales). En este caso, la conclusión es que las cerámicas de ZrO_2 no se pueden utilizar en su forma monoclínica dado que, cuando la zirconia se transforma en la forma tetragonal, lo más probable es que se fracture. Por lo tanto, la ZrO_2 con frecuencia se estabiliza en una forma cúbica utilizando distintos aditivos como el CaO, el MgO y la Y_2O_3.

3-5 Puntos, direcciones y planos de la celda unitaria

Coordenadas de los puntos

Se pueden localizar ciertos puntos, como las posiciones de los átomos, en la red o celda unitaria mediante la construcción del sistema coordenado ortonormal que se presenta en la figura 3-12. La distancia se mide en términos del número de parámetros de red que deben moverse en cada una de las coordenadas x, y y z para obtenerla del origen al punto en cuestión. Las coordenadas se escriben como las tres distancias, con comas que separan los números.

Direcciones en la celda unitaria

Ciertas direcciones en la celda unitaria son de particular importancia. Los **índices de Miller** de las direcciones son la notación abreviada que se utiliza para describirlas. A continuación se explica el procedimiento para encontrar los índices de direcciones de Miller:

1. Mediante un sistema coordenado ortonormal, determine las coordenadas de dos puntos que se encuentran en la dirección.
2. Reste las coordenadas del punto de la "cola" de las coordenadas del punto de la "cabeza" para obtener el número de parámetros de red recorridos en la dirección de cada eje del sistema coordenado.
3. Elimine las fracciones y/o reduzca los resultados obtenidos de la resta a los enteros más bajos.
4. Encierre los números entre corchetes [ ]. Si se produce un signo negativo, represéntelo con una barra sobre él.

El ejemplo 3-7 ilustra una manera de determinar los índices de las direcciones de Miller.

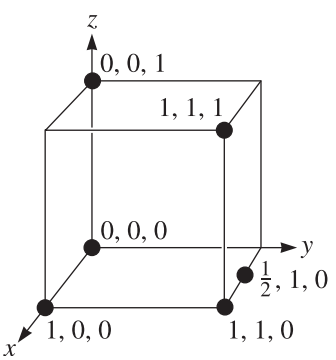


Figura 3-12 Coordenadas de los puntos seleccionados en la celda unitaria. El número se refiere a la distancia del origen en términos de los parámetros de red.

Ejemplo 3-7 *Determinación de los índices de Miller de las direcciones*

Determine los índices de Miller de las direcciones *A*, *B* y *C* de la figura 3-13.

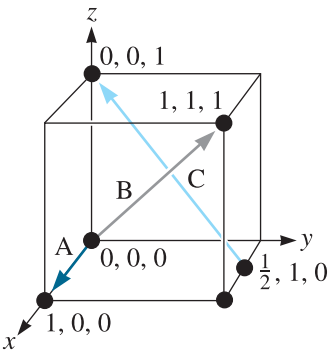


Figura 3-13 Direcciones y coordenadas cristalográficas (del ejemplo 3-7).

SOLUCIÓN

Dirección *A*

1. Dos puntos son 1, 0, 0 y 0, 0, 0
2. 1, 0, 0 − 0, 0, 0 = 1, 0, 0
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. [100]

Dirección *B*

1. Dos puntos son 1, 1, 1 y 0, 0, 0
2. 1, 1, 1 − 0, 0, 0 = 1, 1, 1
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. [111]

Dirección *C*

1. Dos puntos son 0, 0, 1 y $\frac{1}{2}$, 1, 0
2. $0, 0, 1 - \frac{1}{2}, 1, 0 = -\frac{1}{2} - 1, 1$
3. $2\left(-\frac{1}{2}, -1, 1\right) = -1, -2, 2$
4. $[\bar{1}\,\bar{2}\,2]$

Deben observarse varios aspectos acerca del uso de los índices de las direcciones de Miller:

1. Debido a que las direcciones son vectores, una dirección y su negativo no son idénticos; [100] no es igual a $[\bar{1}00]$. Representan la misma línea, pero en direcciones opuestas.
2. Una dirección y su múltiplo son *idénticos*; [100] es la misma dirección que [200].
3. Ciertos grupos de direcciones son *equivalentes*; tienen sus índices particulares debido a la forma en que se construyen las coordenadas. Por ejemplo, en un sistema cúbico, una dirección [100] es una dirección [010] si se redefine el sistema coordenado, como se muestra en la figura 3-14. Puede referirse a los grupos de direcciones equivalentes como **direcciones de una forma** o **familia**. Se utilizan corchetes especiales ⟨⟩ para indicar esta colección de direcciones. En la tabla 3-3 se presentan todas las direcciones de la forma ⟨110⟩. Se espera que un material tenga las mismas propiedades en cada una de estas 12 direcciones de la forma ⟨110⟩ .

Importancia de las direcciones cristalográficas Las direcciones cristalográficas se utilizan para indicar una orientación particular de un monocristal o de un material policristalino orientado. El conocimiento de cómo describirlas puede ser útil en muchas aplicaciones.

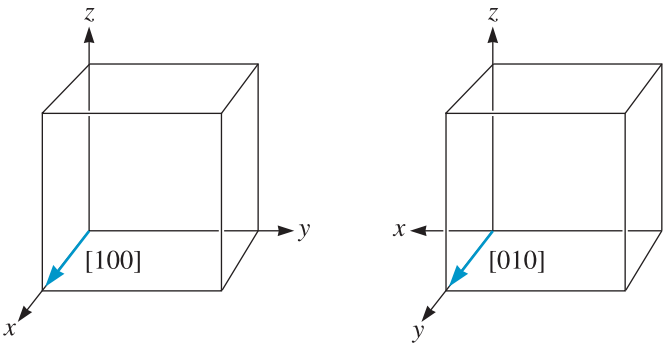


Figura 3-14 Equivalencia de las direcciones cristalográficas de una forma en los sistemas cúbicos.

Tabla 3-3 Direcciones de la forma ‹110› en los sistemas cúbicos

$$\langle 110 \rangle = \begin{cases} [110]\ [\bar{1}\bar{1}0] \\ [101]\ [\bar{1}0\bar{1}] \\ [011]\ [0\bar{1}\bar{1}] \\ [1\bar{1}0]\ [\bar{1}10] \\ [10\bar{1}]\ [\bar{1}01] \\ [01\bar{1}]\ [0\bar{1}1] \end{cases}$$

Por ejemplo, los metales se deforman con mayor facilidad en las direcciones a lo largo de las cuales los átomos están en mayor contacto. Otro ejemplo real es la dependencia de las direcciones cristalográficas de las propiedades magnéticas del hierro y otros materiales magnéticos. Es mucho más sencillo magnetizar el hierro en la dirección [100] que en las direcciones [111] o [110]. Por esta razón los granos de los aceros de Fe-Si que se utilizan en aplicaciones magnéticas (por ejemplo, núcleos de transformadores) están orientados en las direcciones [100] o equivalentes.

Distancia repetitiva, densidad lineal y fracción de empaquetamiento

Otra manera de caracterizar las direcciones es por medio de la **distancia repetitiva** o la distancia entre los puntos de red a lo largo de la dirección. Por ejemplo, se puede examinar la dirección [110] en una celda unitaria CCCa (figura 3-15); si se comenzara en la localización 0, 0, 0, el siguiente punto de red estaría en el centro de una cara o un sitio 1/2, 1/2, 0. Por lo tanto, la distancia entre los puntos de red es un medio de la diagonal de la cara, o $\frac{1}{2}\sqrt{2}\,a_0$. En el caso del cobre, que tiene un parámetro de red de 0.3615 nm, la distancia repetitiva es de 0.2556 nm.

La **densidad lineal** es el número de puntos de red por unidad de longitud a lo largo de la dirección. El cobre tiene dos distancias repetitivas a lo largo de la dirección [110] en cada celda unitaria; dado que esta distancia es $\sqrt{2}a_0 = 0.5112$ nm, entonces:

$$\text{Densidad lineal} = \frac{2 \text{ distancias repetitivas}}{0.5112 \text{ nm}} = 3.91 \text{ puntos de red/nm}$$

Observe que la densidad lineal también es el recíproco de la distancia repetitiva.

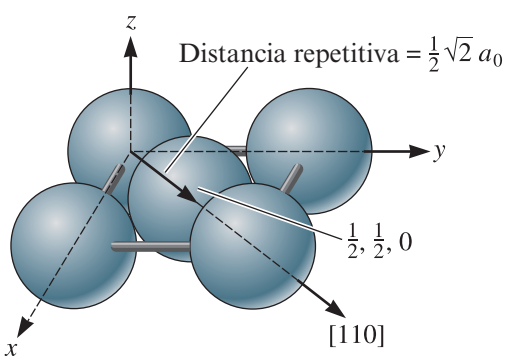


Figura 3-15 Determinación de la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento de una dirección [110] en el caso del cobre CCCa.

Por último, se puede calcular la fracción de empaquetamiento de una dirección específica o la fracción cubierta en realidad por los átomos. En el caso del cobre, en el que se localiza un átomo en cada punto de red, esta fracción es igual al producto de la densidad lineal y el doble del radio atómico. En la dirección [110] en el cobre CCCa, el radio atómico es $r = \sqrt{2}a_0/4 = 0.1278$ nm. Por lo tanto, la fracción de empaquetamiento es:

$$\begin{aligned}\text{Fracción de empaquetamiento} &= (\text{densidad lineal})(2r)\\ &= (3.91)(2)(0.1278)\\ &= (1.0)\end{aligned}$$

Un valor de 1.0 es consistente con la dirección [110], dado que esta es compacta en los metales CCCa.

Planos en la celda unitaria

Ciertos planos de átomos en un cristal también tienen gran importancia. Por ejemplo, los metales se deforman a lo largo de los planos de los átomos en los que están lo más compactamente posible. La energía superficial de las distintas caras de un cristal depende de los planos cristalográficos particulares, característica que adquiere gran importancia en el crecimiento de los cristales. Cuando películas delgadas de ciertos materiales electrónicos (por ejemplo, el Si o el GaAs) crecen, se necesita asegurar que el sustrato esté orientado de tal manera que la película pueda crecer sobre un plano cristalográfico específico.

Se utilizan índices de Miller como notación abreviada para identificar estos planos importantes, como se describe en el siguiente procedimiento.

1. Identifique los puntos en los que el plano interseca las coordenadas x, y y z en términos del número de parámetros de red. Si el plano pasa a través del origen, debe moverse el origen del sistema coordenado al de una celda unitaria adyacente.
2. Tome los recíprocos de estas intersecciones.
3. Elimine fracciones pero no reduzca a los enteros más bajos.
4. Encierre entre paréntesis () los números resultantes. De nuevo, debe escribir los números negativos con una barra sobre ellos.

El siguiente ejemplo muestra cómo pueden obtenerse los índices de Miller de los planos.

Ejemplo 3-8 *Determinación de los índices de los planos de Miller*

Determine los índices de los planos de Miller A, B y C en la figura 3-16.

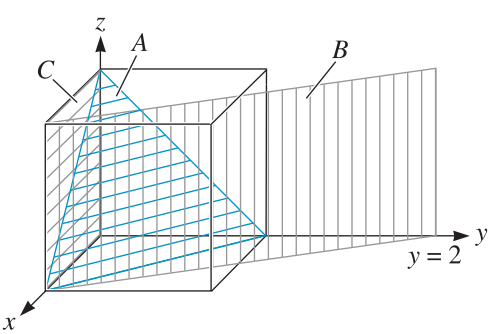


Figura 3-16 Planos e intersecciones cristalográficos (ejemplo 3-8).

SOLUCIÓN

Plano *A*

1. $x = 1, y = 1, z = 1$
2. Tome los recíprocos: 1, 1, 1
3. No hay que eliminar fracciones
4. (111)

Plano *B*

1. El plano nunca interseca el eje z, por lo que $x = 1$, $y = 2$ y $z = \infty$
2. Tome los recíprocos: 1, ½, 0
3. Elimine las fracciones: 2,1,0
4. (210)

Plano *C*

1. Se debe mover el origen, dado que el plano pasa a través de (0, 0, 0). Se mueve el origen un parámetro de red en la dirección y. Entonces, $x = \infty$, $y = -1$ y $z = \infty$.
2. Tome los recíprocos 0, -1, 0
3. No hay que eliminar fracciones
4. $(0\bar{1}0)$

Deben observarse varios aspectos importantes de los índices de los planos de Miller:

1. Los planos y sus negativos son idénticos (lo cual no sucede en el caso de las direcciones), debido a que son paralelos. Por lo tanto, $(020) = (0\bar{2}0)$.
2. Los planos y sus múltiplos no son idénticos (de nuevo, esto es lo opuesto de lo que se encontró en el caso de las direcciones). Se puede demostrar esta desigualdad mediante la definición de las densidades planares y las fracciones de empaquetamiento planares. La **densidad planar** es el número de átomos por unidad de área con centros que se encuentran en el plano; la fracción de empaquetamiento es la fracción del área de ese plano cubierta por esos átomos. En el ejemplo 3-9 se muestra cómo pueden calcularse estas.
3. En cada celda unitaria los **planos de una forma** o **familia** representan los grupos de planos equivalentes que tienen sus índices particulares, debido a la orientación de las coordenadas. Se representan estos grupos de planos similares con la notación {}. En la tabla 3-4 se muestran los planos de una forma {110} en los sistemas cúbicos.
4. En los sistemas cúbicos una dirección que tiene los mismos índices que un plano es perpendicular a ese plano.

Tabla 3-4 Planos de la forma {110} en los sistemas cúbicos

$$\{110\} = \begin{cases} (110) \\ (101) \\ (011) \\ (1\bar{1}0) \\ (10\bar{1}) \\ (01\bar{1}) \end{cases}$$

Nota: Los negativos de los planos no son planos únicos.

Ejemplo 3-9 *Cálculo de la densidad y la fracción de empaquetamiento planares*

Calcule la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar de los planos (010) y (020) del polonio cúbico sencillo, cuyo parámetro de red es de 0.334 nm.

SOLUCIÓN

En la figura 3-17 están trazados los dos planos. En el plano (010), los átomos están centrados en cada esquina de la cara del cubo, en realidad con 1/4 de cada átomo en la cara de la celda unitaria.

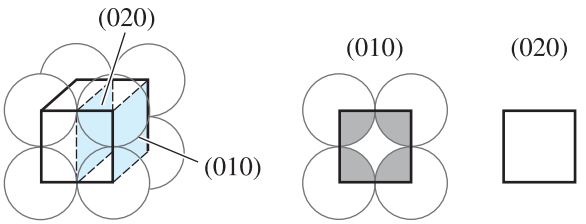


Figura 3-17 Las densidades planares de los planos (010) y (020) de las celdas unitarias CS no son idénticas (ejemplo 3-9).

Por lo tanto, los átomos totales en cada cara es uno. La densidad planar es:

$$\text{Densidad planar (010)} = \frac{\text{átomos por cara}}{\text{área de la cara}} = \frac{1 \text{ átomo por cara}}{(0.334 \text{ nm})^2}$$
$$= 8.96 \text{ átomos/nm}^2 = 8.96 \times 10^{14} \text{ átomos/cm}^2$$

La fracción de empaquetamiento planar está dada por:

$$\text{Fracción de empaquetamiento (010)} = \frac{\text{área de los átomos por cara}}{\text{área de la cara}} = \frac{(1 \text{ átomo})(\pi r^2)}{(a_0)^2}$$
$$= \frac{\pi r^2}{(2r)^2} = 0.79$$

Ningún átomo está centrado en los planos (020). Por lo tanto, la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar son cero. ¡Los planos (010) y (020) no son equivalentes!

Construcción de direcciones y planos

Para construir una dirección o un plano en la celda unitaria, simplemente se trabaja hacia atrás. El ejemplo 3-10 muestra cómo podría hacerse esta tarea.

Ejemplo 3-10 *Dibujo de dirección y plano*

Dibuje *a*) la dirección $[1\bar{2}1]$ y *b*) el plano $(\bar{2}10)$ en una celda unitaria cúbica.

SOLUCIÓN

a) Debido a que se sabe que es necesario moverse en la dirección *y* negativa, el origen se localiza en (0, +1, 0). La "cola" de la dirección se debe ubicar en este nuevo origen. Puede determinarse un segundo punto en la dirección moviéndose +1 en la dirección *x*, −2 en la dirección *y* y +1 en la dirección *z* [figura 3-18*a*)]

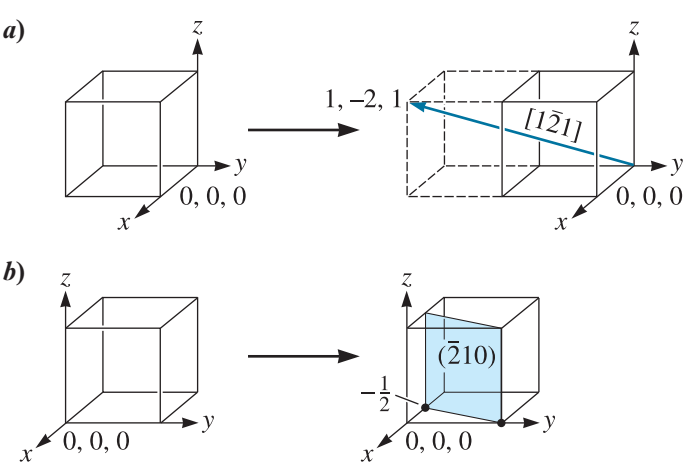


Figura 3-18 Construcción de *a*) una dirección y *b*) un plano dentro de una celda unitaria (ejemplo 3-10).

b) Para dibujar el plano $(\bar{2}10)$, primero tome los recíprocos de los índices para obtener las intersecciones, es decir

$$x = \frac{1}{-2} = -\frac{1}{2}; \; y = \frac{1}{1} = 1; \; z = \frac{1}{0} = \infty$$

Dado que la intersección en x es una dirección negativa y se desea dibujar el plano dentro de la celda unitaria, se mueve el origen $+1$ en la dirección x a (1, 0, 0). Después se puede localizar la intersección en x en $-1/2$ y la intersección en y en $+1$. El plano será paralelo al eje z [figura 3-18*b*)].

Índices de celdas unitarias hexagonales de Miller

Se ha diseñado un conjunto especial de índices de Miller-Bravais para las celdas unitarias hexagonales debido a la simetría única del sistema (figura 3-19). El sistema coordenado utiliza cuatro ejes en lugar de tres, con el eje a_3 redundante. Los ejes a_1, a_2 y a_3 se encuentran en un plano que es perpendicular al cuarto eje. El procedimiento para encontrar los índices de los planos es exactamente el mismo que antes, pero se requieren cuatro intersecciones, lo que da índices de la forma (*hkil*). Debido a la redundancia del eje a_3 y a la geometría especial del sistema, los primeros tres enteros designados, que corresponden a las intersecciones a_1, a_2 y a_3, están relacionados por $h + k = -i$.

Las direcciones en las celdas CH se denotan con el sistema de tres o cuatro ejes. Con el sistema de tres ejes el procedimiento es el mismo que en el caso de los índices de Miller convencionales; en el ejemplo 3-11 se muestran ejemplos de este procedimiento. Sin embargo, en el caso del sistema con cuatro ejes es necesario utilizar un procedimiento más complicado, por medio del cual la dirección se descompone en cuatro vectores. Se determina el número de parámetros de red que deben moverse en cada dirección para ir de la "cola" a la "cabeza" de la dirección, mientras se sigue asegurando por consistencia que $h + k = -i$. Este caso se ilustra en la figura 3-20, que muestra que la dirección [010] es la misma que la dirección $[\bar{1}2\bar{1}0]$.

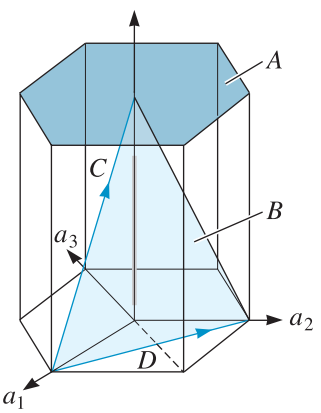


Figura 3-19 Los índices de Miller-Bravais de los planos cristalográficos en las celdas unitarias CH se obtienen utilizando un sistema coordenado con cuatro ejes. Los planos etiquetados *A* y *B* y las direcciones etiquetadas *C* y *D* son las que se explicaron en el ejemplo 3-11.

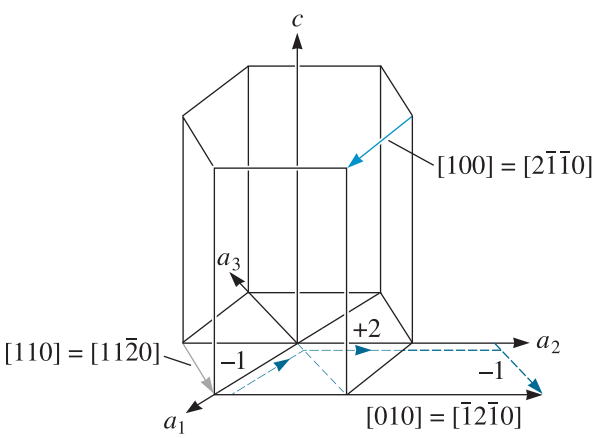


Figura 3-20 Direcciones comunes en la celda unitaria CH, utilizando sistemas con tres y cuatro ejes. Las líneas punteadas muestran que la dirección $[\bar{1}2\bar{1}0]$ es equivalente a la dirección [010].

Ejemplo 3-11 *Determinación de los índices de Miller-Bravais de los planos y las direcciones*

Determine los índices de Miller-Bravais de los planos *A* y *B* y las direcciones *C* y *D* de la figura 3-91.

SOLUCIÓN

Plano *A*

1. $a_1 = a_2 = a_3 = \infty$, $c = 1$
2. Tome los recíprocos: 0, 0, 0, 1
3. No hay que eliminar fracciones.
4. (0001)

Plano *B*

1. $a_1 = 1$, $a_2 = 1$, $a_3 = -\frac{1}{2}$, $c = 1$
2. Tome los recíprocos: 1, 1, −2, 1
3. No hay que eliminar fracciones
4. $[11\bar{2}1]$

Dirección *C*

1. Dos puntos son 0, 0, 1 y 1, 0, 0
2. 0, 0, 1 − 1, 0, 0 = −1, 0, 1
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. $[\bar{1}\,01]$ o $[\bar{2}113]$

Dirección *D*

1. Dos puntos son 0, 1, 0 y 1, 0, 0
2. 0, 1, 0 − 1, 0, 0 = −1, 1, 0
3. No hay que eliminar fracciones o reducir enteros
4. $[\bar{1}10]$ o $[\bar{1}100]$

También se puede convertir la notación con tres ejes en la notación con cuatro ejes de las direcciones por medio de las siguientes relaciones, donde *h*', *k*' y *l*' son los índices del sistema con tres ejes:

$$\left.\begin{aligned} h &= \frac{1}{3}(2h' - k') \\ k &= \frac{1}{3}(2k' - h') \\ i &= -\frac{1}{3}(h' + k') \\ l &= l' \end{aligned}\right\} \tag{3-6}$$

Después de la conversión, los valores de *h*, *k*, *i* y *l* pueden requerir eliminar las fracciones o reducir los enteros más bajos.

Planos y direcciones compactos Cuando se examina la relación entre el radio atómico y el parámetro de red, se buscan las direcciones compactas, donde los átomos están en

Tabla 3-5 Planos y direcciones compactos

Estructura	Direcciones	Planos
CS	⟨100⟩	Ninguno
CCCu	⟨111⟩	Ninguno
CCCa	⟨110⟩	{111}
CH*	[100], [010], [110]	(001), (002)

**En la notación de cuatro ejes, las direcciones y planos compactos son ⟨11$\bar{2}$0⟩ y (0001).*

contacto continuo. Ahora se pueden asignar índices de Miller a estas direcciones compactas, como se muestra en la tabla 3-5.

También se pueden examinar más de cerca las celdas unitarias CCCa y CH y descubrir que hay por lo menos un conjunto de planos compactos en cada una. En la figura 3-21 se muestran los planos compactos. Observe que se produce un arreglo hexagonal de átomos en dos dimensiones. Dichos planos son fáciles de encontrar en la celda unitaria CH; son los planos (0001) y (0002) de la estructura CH y se les da el nombre especial de **planos basales**. En realidad se puede construir una celda unitaria CH apilando planos compactos en una **secuencia de apilamiento** . . . *ABABAB* . . . (figura 3-21). Los átomos del plano *B*, el plano (0002), se ajustan en los valles entre los átomos del plano *A*, el plano inferior (0001). Si se coloca otro plano idéntico en la orientación al plano *A* en los valles del plano *B* directamente sobre el plano *A*, se crea la estructura CH. Observe que todos los planos compactos posibles son paralelos entre sí. Sólo los planos basales (0001) y (0002) son compactos.

A partir de la figura 3-21 se encuentra el número de coordinación de los átomos en la estructura CH. El átomo central en un plano basal toca otros seis átomos ubicados en el mismo plano. Tres átomos del plano inferior y tres átomos de un plano superior también tocan el mismo átomo. El número de coordinación es 12.

En la estructura CCCa, los planos compactos son de la forma {111} (figura 3-22). Cuando se apilan planos (111) paralelos, los átomos del plano *B* se ajustan sobre los valles del plano *A* y los átomos del plano *C* se ajustan sobre los valles de los planos *A* y *B*. El cuarto plano se ajusta directamente sobre los átomos en el plano *A*. En consecuencia, se produce una secuencia de apilamiento . . . *ABCABCABC* . . . utilizando el plano (111). De nuevo, se encuentra que cada átomo tiene un número de coordinación igual a 12.

A diferencia de la celda unitaria CH, hay cuatro conjuntos de planos compactos no paralelos (111), (11$\bar{1}$), (1$\bar{1}$1) y ($\bar{1}$11) en la celda unitaria CCCa. Esta diferencia entre las celdas unitarias CCCa y CH —la presencia o ausencia de planos compactos intersecantes—, afecta el comportamiento de los metales con estas estructuras.

Comportamiento isotrópico y anisotrópico

Debido a las diferencias entre los arreglos atómicos en los planos y direcciones dentro de un cristal, algunas propiedades también varían junto con la dirección. Un material es cristalográficamente **anisotrópico** si sus propiedades dependen de la dirección cristalográfica a lo largo de la cual se mide la propiedad. Por ejemplo, el módulo de elasticidad del aluminio es de 75.9 GPa (11×10^6 psi) en las direcciones ⟨111⟩, pero de sólo 63.4 GPa (9.2×10^6 psi) en las direcciones ⟨100⟩. Si las propiedades son idénticas en todas las direcciones, el material es cristalográficamente **isotrópico**. Observe que un material como el aluminio,

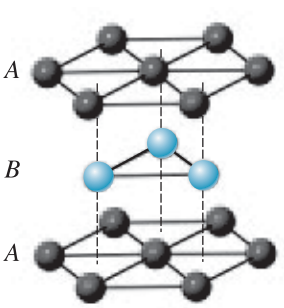


Figura 3-21 La secuencia de apilamiento *ABABAB* de los planos compactos produce la estructura CH.

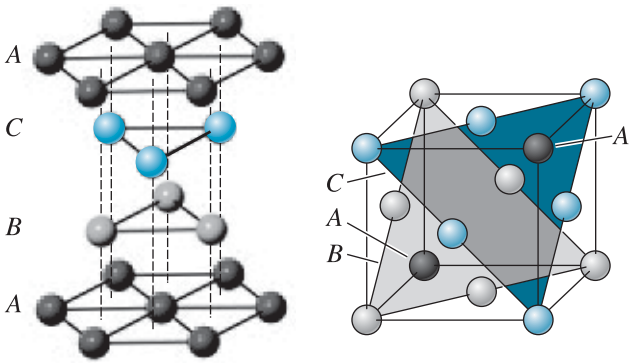


Figura 3-22 La secuencia de apilamiento *ABCABCABC* de los planos compactos produce la estructura CCCa.

el cual es cristalográficamente anisotrópico, puede comportarse como un material isotrópico si está en una forma policristalina. Esto se debe a que las orientaciones al azar de los distintos cristales de un material policristalino cancelarán en su mayoría cualquier efecto de la anisotropía como resultado de la estructura cristalina. En general, la mayoría de los materiales policristalinos exhibirán propiedades isotrópicas. Los materiales monocristalinos, en los cuales varios granos están orientados a lo largo de ciertas direcciones (obtenidas de manera natural o deliberada por medio del procesamiento), por lo general tendrán propiedades mecánicas, ópticas, magnéticas y dieléctricas anisotrópicas.

Espaciado interplanar

A la distancia entre dos planos paralelos adyacentes de átomos con los mismos índices de Miller se le llama **espaciado interplanar** (d_{hkl}). El espaciado interplanar en materiales cúbicos está dado por la ecuación general

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \tag{3-6}$$

donde a_0 es el parámetro de red y h, k y l representan los índices de Miller de los planos adyacentes que se están considerando. Los espaciados interplanares de los materiales no cúbicos están dados por expresiones más complejas.

3-6 Sitios intersticiales

En todas las estructuras cristalinas existen pequeños orificios entre los átomos en los que pueden colocarse átomos más pequeños. A estas localizaciones se les llama **sitios intersticiales**.

Un átomo, cuando se coloca dentro de un sitio intersticial, toca dos o más átomos de la red. Este átomo intersticial tiene un número de coordinación igual al número de átomos que toca. La figura 3-23 muestra las localizaciones intersticiales en las estructuras CS, CCCu y CCCa.

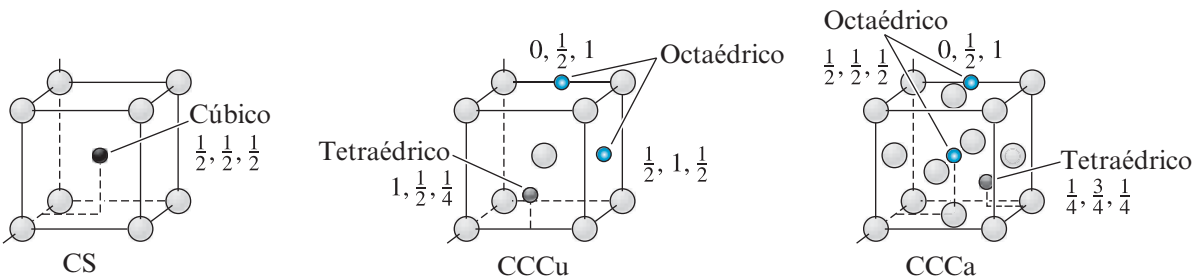


Figura 3-23 Localización de los sitios intersticiales en las celdas unitarias cúbicas. Sólo se muestran los sitios representativos.

Ejemplo 3-12 *Cálculo de los sitios octaédricos*

Demuestre que el número de sitios octaédricos que pertenecen de *manera única* a una celda unitaria CCCa es cuatro.

SOLUCIÓN

Los sitios octaédricos incluyen las 12 aristas de la celda unitaria, con las coordenadas

$$\begin{array}{cccc} \frac{1}{2},0,0 & \frac{1}{2},1,0 & \frac{1}{2},0,1 & \frac{1}{2},1,1 \\ 0,\frac{1}{2},0 & 1,\frac{1}{2},0 & 1,\frac{1}{2},1 & 0,\frac{1}{2},1 \\ 0,0,\frac{1}{2} & 1,0,\frac{1}{2} & 1,1,\frac{1}{2} & 0,1,\frac{1}{2} \end{array}$$

más la posición central (1/2, 1/2, 1/2). Cada uno de los sitios de la arista de la celda unitaria compartido entre cuatros celdas unitarias, por lo que sólo 1/4 de cada sitio pertenece de manera única a cada celda unitaria. Por lo tanto, el número de sitios que pertenecen de manera única a cada celda es

$$\frac{12 \text{ aristas}}{\text{celda}} \cdot \frac{1/4 \text{ sitio}}{\text{arista}} + \frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda}} \cdot \frac{1 \text{ sitio}}{\text{centrada en el cuerpo}} = 4 \text{ sitios octaédricos/celda}$$

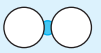
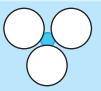
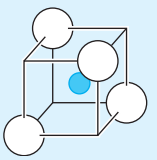
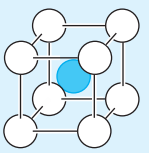
El **sitio cúbico**, cuyo número de coordinación es ocho, ocurre en la estructura CS en la posición centrada en el cuerpo. Los **sitios octaédricos** dan un número de coordinación de seis (no ocho). Se les conoce como sitios octaédricos porque los átomos que tienen contacto con el átomo intersticial forman un octaedro. Los **sitios tetraédricos** dan un número de coordinación de cuatro. Como ejemplo, los sitios octaédricos de las celdas unitarias CCCu se localizan en los centros de las caras y de las aristas del cubo; un átomo pequeño colocado en el sitio octaédrico toca los cuatro átomos de las esquinas de la cara, el átomo del centro de la celda unitaria, más otro átomo en el centro de la celda unitaria adyacente, lo que da un número de coordinación de seis. En las celdas unitarias CCCa, los sitios octaédricos se encuentran en el centro de cada arista del cubo, al igual que en el centro del cuerpo de la celda unitaria.

Si se cuenta de la misma manera en que los átomos se cuentan en una celda unitaria, hay seis sitios octaédricos de la estructura CCCu y cuatro sitios octaédricos en la estructura CCCa por celda unitaria. Hay doce sitios tetraédricos en la estructura CCCu y ocho sitios tetraédricos en la estructura de CCCa por celda unitaria.

Los átomos o iones intersticiales, cuyos radios son ligeramente mayores que el radio del sitio intersticial, pueden entrar en ese sitio, lo cual separa ligeramente los átomos circundantes. A los átomos cuyos radios son menores que el radio del orificio no se les permite entrar en el sitio intersticial debido a que el ion "traquetearía" alrededor del sitio. Si el átomo intersticial se agranda demasiado, prefiere entrar a un sitio que tenga un número de coordinación mayor (tabla 3-6). Por lo tanto, un átomo con una razón de radios de entre 0.225 y 0.414 entra a un sitio tetraédrico; si su radio es un poco mayor de 0.414, entra en un sitio octaédrico.

Muchos cristales iónicos (vea la sección 3-7) pueden verse como si estuvieran generados por el empaquetamiento compacto de aniones grandes. Entonces los cationes pueden verse como iones más pequeños que se ajustan en los sitios intersticiales de los aniones compactos. Por ello, la razón de los radios descrita en la tabla 3-6 también se aplica a las razones de los radios del catión del anión. El empaquetamiento en cristales iónicos no es tan ajustado como en los metales CCCa o CH.

Tabla 3-6 Número de coordinación y razón de los radios. Los átomos/iones están dibujados incompletos con propósitos de claridad.

Número de coordinación	Localización del intersticial	Razón de los radios	Representación
2	Lineal	0–0.155	
3	Centro del triángulo	0.155–0.225	
4	Centro del tetraedro	0.225–0.414	
6	Centro del octaedro	0.414–0.732	
8	Centro del cubo	0.732–1.000	

3-7 Estructuras cristalinas de los materiales iónicos

Los materiales iónicos deben tener estructuras cristalinas que aseguren la neutralidad eléctrica, pero que permitan que los iones de distintos tamaños se empaquen de manera eficiente. Como ya se mencionó, las estructuras cristalinas iónicas pueden verse como estructuras compactas de aniones. Los aniones forman tetraedros u octaedros, lo que permite que los cationes entren en los sitios intersticiales apropiados. En algunos casos puede ser más sencillo visualizar el poliedro de coordinación de los cationes con los aniones pasando a los sitios intersticiales. Recuerde del capítulo 2 que, con mucha frecuencia, en los materiales reales con aplicaciones en la ingeniería el enlace nunca es 100% iónico. Sin embargo, aún se utiliza esta descripción de la estructura cristalina para explicar la estructura cristalina de los materiales cerámicos. Se deben considerar los siguientes factores para comprender las estructuras cristalinas de los sólidos enlazados iónicamente.

Radios iónicos

Con frecuencia, las estructuras cristalinas de los compuestos enlazados iónicamente pueden describirse si se colocan los aniones en los puntos de red normales de una celda unitaria, con los cationes localizados en uno o más de los sitios intersticiales descritos en la sección 3-6 (o viceversa). La razón de los tamaños de los radios iónicos de los aniones y cationes influye en la manera del empaquetamiento y en el número de coordinación (tabla 3-6). Observe que los radios de los átomos e iones son distintos. Por ejemplo, el radio de un átomo de oxígeno es de 0.6 Å; sin embargo, el de un anión oxígeno (O^{2-}) es de 1.32 Å. Esta diferencia se debe a que un anión oxígeno ha adquirido dos electrones adicionales y se ha agrandado. Como regla general, los aniones son mayores que los cationes. Se espera que los cationes, en razón de que han adquirido una carga positiva debido a la pérdida de electrones, sean más pequeños. En un lenguaje más estricto, los radios de los cationes y aniones también dependen del número de coordinación. Por ejemplo, el radio de un ion Al^{3+} es de 0.39 Å cuando el número de coordinación es cuatro (coordinación tetraédrica); sin embargo, el radio del ion Al^{3+} es de 0.53 Å cuando el número de coordinación es 6 (coordinación octaédrica). Además, observe que el número de coordinación de los cationes es el número de aniones más cercanos y viceversa. El radio de un átomo también depende del número de coordinación. Por ejemplo, ¡el radio de un átomo de hierro en los polimorfos CCCa y CCCu es diferente! Esto

indica que los átomos y los iones no son "esferas duras" con radios atómicos fijos. El apéndice B de este libro contiene los radios atómicos y iónicos de los distintos elementos.

Neutralidad eléctrica

En general, los materiales tienen que ser eléctricamente neutros. Si las cargas del anión y del catión son idénticas y el número de coordinación de cada ion es idéntico para asegurar un balance apropiado de la carga, el compuesto tendrá una fórmula AX (A: catión, X: anión). Como ejemplo, cada catión puede estar rodeado por seis aniones, mientras que cada anión está, a su vez, rodeado por seis cationes. Si la valencia del catión es de $+2$ y la del anión es de -1, entonces debe estar presente el doble de aniones y la fórmula es AX_2. La estructura de este compuesto debe asegurar que el número de coordinación del catión duplique el número de coordinación del anión. Por ejemplo, cada catión puede tener ocho aniones vecinos más cercanos, con sólo cuatro cationes tocando cada anión.

Conexión entre los poliedros de los aniones

Como regla, los poliedros de coordinación (formados por medio del empaquetamiento compacto de los aniones) compartirán esquinas opuestas a las caras o a las aristas. Esto se debe a que en los poliedros que comparten esquinas, la repulsión electrostática entre los cationes se reduce de manera considerable, lo que conduce a la formación de una estructura cristalina más estable. En las siguientes explicaciones se describen varias estructuras comunes de los materiales cerámicos. En comparación con los metales, las estructuras cerámicas son más complejas. Las constantes de red de los materiales cerámicos tienden a ser mayores que las de los materiales metálicos, debido a que la repulsión electrostática entre los iones previene el empaquetamiento compacto de los aniones y cationes.

Ejemplo 3-13 *Razón de los radios del CsI*

El yoduro de Cesio (CsI), que se emplea en cristales ópticos con muchas aplicaciones, emite luz cuando se expone a radiación de onda corta. Con respecto a este material, *a*) verifique si el compuesto tiene la estructura del cloruro de cesio y *b*) calcule el factor de empaquetamiento del compuesto.

SOLUCIÓN

a) Del apéndice B sabemos que $r_{Cs+}=0.167\text{nm}$ y $r_{I-}=0.220\text{nm}$, por lo que

$$\frac{r_{Cs^+}}{r_{I^-}} = \frac{0.167\text{ nm}}{0.220\text{ nm}} = 0.759$$

Dado que $0.732 < 0.759 < 1.000$, el número de coordinación de cada tipo de ion es ocho, por lo que es posible que cuente con una estructura como la de CsCl.

b) Los iones se tocan en el cuerpo diagonal de la celda unitaria, por lo que

$$\sqrt{3}a_0 = 2r_{Cs^+} + 2r_{I^-} = 2(0.167) + 2(0.220) = 0.774$$

$$a_0 = 0.447\text{ nm}$$

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_{Cs^+}^3\,(1\text{ Cs ion}) + \frac{4}{3}\pi r_{I^-}^3\,(1\text{ I ion})}{a_0^3}$$

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{\frac{4}{3}\pi\,(0.167\text{ nm})^3\,(1\text{ Cs ion}) + \frac{4}{3}\pi\,(0.220\text{ nm})^3\,(1\text{ I ion})}{(0.447\text{ nm})^3} = 0.72$$

Estructura del cloruro de sodio

La razón de los radios de los iones sodio y cloruro es $r_{Na+}/r_{Cl-} = 0.097\text{ nm}/(0.181\text{ nm}) = 0.536$; el ion sodio tiene una carga de $+1$; el ion cloruro tiene una carga de -1. Por lo tanto, con base en el balance de las cargas y la razón de los

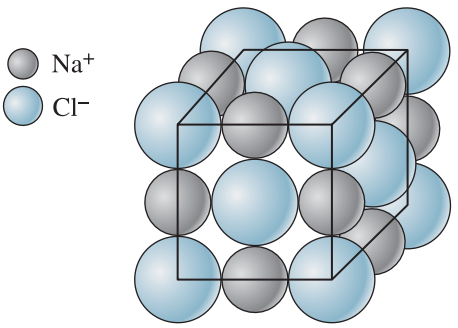


Figura 3-24 Estructura del cloruro de sodio, una celda unitaria CCCa con dos iones (Na^+ y Cl^-) por punto de red. *Nota*: El tamaño de los iones no está a escala.

radios, cada anión y cada catión debe tener un número de coordinación de seis. La estructura CCCa, con los iones Cl- en las posiciones CCCa y los Na+ en los cuatro sitios octaédricos, cumple estos requisitos (figura 3-24). También puede considerarse que esta estructura sea CCCa con dos iones, un Na+ y un Cl−, asociados con cada punto de red. Muchas cerámicas, entre ellas el óxido de magnesio (MgO), el óxido de calcio (CaO) y el óxido de hierro (FeO) tienen esta estructura.

Estructura de la blenda de zinc

La blenda de zinc es el nombre de la estructura cristalina adoptada por el ZnS. Aunque los iones Zn tienen una carga de +2 y los iones S tienen una carga de −2, la blenda de zinc (ZnS) no puede tener la estructura del cloruro de sodio debido a que

$$\frac{r_{Zn^{+2}}}{r_{S^{-2}}} = 0.074 \text{ nm}/(0.184 \text{ nm}) = 0.402$$

Esta razón de los radios demanda un número de coordinación de cuatro, lo cual a su vez significa que los iones zinc entran a los sitios tetraédricos en una celda unitaria (figura 3-25). La estructura CCCa, con los aniones sulfuro en los puntos de red normales y los cationes Zn a la mitad de los sitios tetraédricos, puede cumplir las restricciones del balance de cargas y del número de coordinación. Esta estructura tiene varios materiales, como el semiconductor GaAs y muchos otros semiconductores III-V (capítulo 2).

Ejemplo 3-14 *Ilustración de una estructura cristalina y cálculo de la densidad*

Demuestre que el MgO tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y calcule la densidad del MgO.

SOLUCIÓN

Con base en el apéndice B, $r_{Mg+2} = 0.066$ nm y $r_{O-2} = 0.132$ nm, por lo que

$$\frac{r_{Mg^{+2}}}{r_{O^{-2}}} = \frac{0.066 \text{ nm}}{0.132 \text{ nm}} = 0.50$$

Dado que $0.414 < 0.50 < 0.732$, el número de coordinación de cada ion es seis y es posible la estructura del cloruro de sodio.

La masa atómica del magnesio es de 24.312 y la del oxígeno es de 16.00 g/mol. Los iones se tocan a lo largo de la arista del cubo, por lo que

$$a_0 = 2r_{Mg^{+2}} + 2r_{O^{-2}} = 2(0.066) + 2(0.132) = 0.396 \text{ nm} = 3.96 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\rho = \frac{(4\ Mg^{+2})\ (24.312 \text{ g/mol}) + (4\ O^{-2})\ (16.00 \text{ g/mol})}{(3.96 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 (6.022 \times 10^{23}/\text{mol})} = 4.31 \text{ g/cm}^3$$

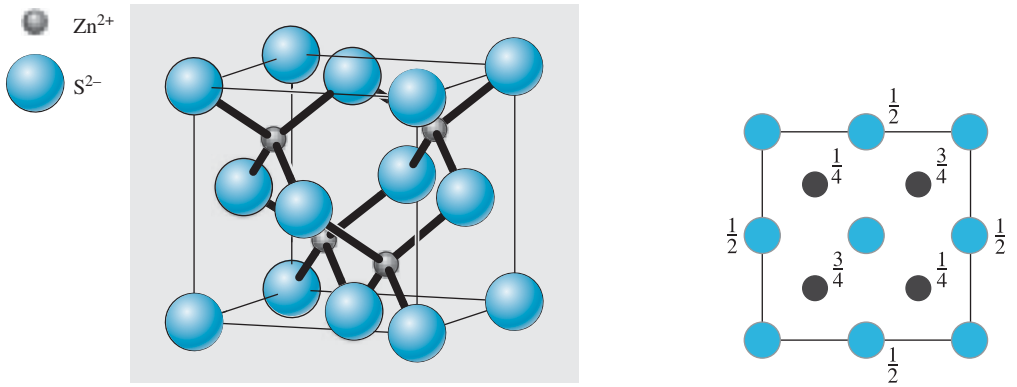


Figura 3-25 *a*) Celda unitaria de la blenda de zinc, *b*) vista en planta. Las fracciones indican las posiciones de los átomos fuera de la página en relación con la altura de una celda unitaria.

Ejemplo 3-15 *Cálculo de la densidad teórica del GaAs*

La constante de red del arseniuro de galio (GaAs) es de 5.65 Å. Demuestre que su densidad teórica es de 5.33 g/cm^3.

SOLUCIÓN

En cada celda unitaria de "blenda de zinc" del GaAs se encuentran cuatro átomos de Ga y cuatro de As.

Cada mol de Ga tiene una masa de 69.72 g. Por lo tanto, la masa de cuatro átomos de Ga será de 4 átomos $\times$ (69.72 g/mol) / (6.022 $\times$ 10^{23} átomos/mol).

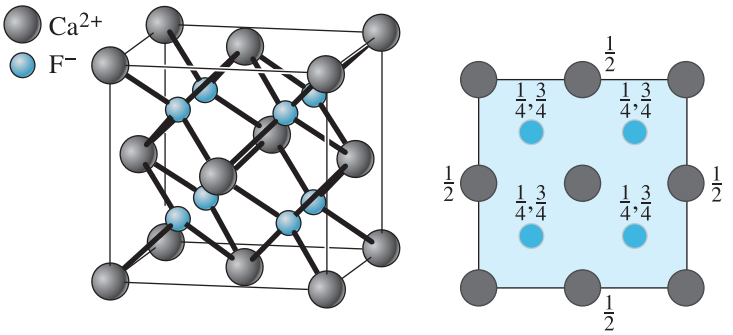
Cada mol de As tiene una masa de 74.92 g. Por ello, la masa de cuatro átomos de As será de 4 átomos$\times$ 74.92 g/mol/ (6.022 $\times$ 10^{23} átomos/mol).

Estos átomos ocupan un volumen de (5.65 $\times$ 10^{-8})^3 cm^3.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{4(69.72 + 74.92)/(6.022 \times 10^{23})}{(5.65 \times 10^{-8})^3} = 5.33 \text{ g/cm}^3$$

Estructura de la fluorita La estructura de la fluorita es CCCa, y sus aniones se localizan en las ochos posiciones tetraédricas (figura 3-26). Por lo tanto, hay cuatro cationes y ocho aniones por celda, y el compuesto cerámico debe tener la fórmula AX_2, como la fluorita de calcio o CaF_2. En la designación AX_2, A es el catión y X es el anión. El número de coordinación de los iones calcio es ocho, pero el de los iones fluoruro es cuatro, por lo que se asegura un balance de las cargas. Uno de los polimorfos de la ZrO_2 conocido como zirconia cúbica exhibe esta estructura cristalina. Otros compuestos que exhiben esta estructura incluyen al UO_2, el ThO_2 y el CeO_2.

Estructura del corindón Esta es una de las estructuras cristalinas de la alúmina conocida como alúmina alfa (α-Al_2O_3). En la alúmina, los aniones oxígeno se empacan en un arreglo hexagonal y los cationes aluminio ocupan alguna de las posiciones octaédricas disponibles (figura 3-27). Probablemente, la alúmina es el material cerámico que más se usa. Las aplicaciones incluyen, pero no se limitan a, bujías, refractarios, sustratos de empaquetamiento electrónico y abrasivos.



Celda de la fluorita — *a*) Vista en planta — *b*)

Figura 3-26 *a*) Celda unitaria de la fluorita. *b*) Vista en planta. Las fracciones indican las posiciones de los átomos fuera de la página en relación con la altura de la celda unitaria.

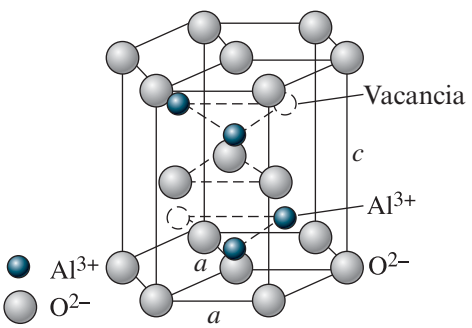


Figura 3-27 Estructura del corindón de la alúmina alfa (α-Al_2O_3).

Ejemplo 3-16 *Estructura cristalina de la perovskita*

La perovskita es un mineral que contiene calcio, titanio y oxígeno. Su celda unitaria es cúbica y tiene un átomo de calcio en cada esquina, un átomo de oxígeno centrado en cada cara y un átomo de titanio en la posición centrada en el cuerpo. Los iones contribuyen a la celda unitaria de la manera usual (una contribución de 1/8 de ion por cada ion en las esquinas, etcétera).

a) Describa esta estructura como una red y una base. *b*) ¿Cuántos átomos de cada tipo hay en cada celda unitaria? *c*) Otra manera de dibujar la celda unitaria de la perovskita tiene el calcio en la posición centrada en el cuerpo de cada celda unitaria cúbica. ¿Cuáles son las posiciones de los átomos de titanio y oxígeno en esta representación de la celda unitaria? *d*) Cuente el número de átomos de cada tipo por celda unitaria, y demuestre que la fórmula de la perovskita es la misma de ambas representaciones de la celda unitaria.

SOLUCIÓN

a) La red debe pertenecer al sistema cristalino cúbico. Dado que se localizan distintos tipos de átomos en las esquinas, centrados en la cara y en el cuerpo, la red debe ser cúbica sencilla. La estructura puede describirse como una red cúbica sencilla con una base de Ca (0, 0, 0), Ti (1/2, 1/2, 1/2) y O (0, 1/2, 1/2), (1/2, 0, 1/2) y (1/2, 1/2, 0). En la figura 3-28 se muestra la celda unitaria.

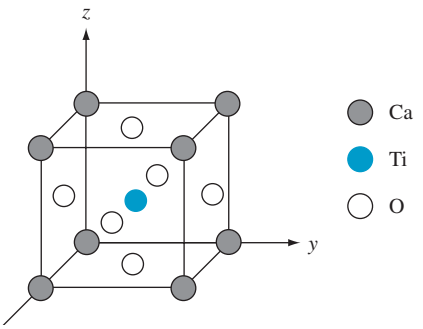


Figura 3-28 Celda unitaria de la perovskita.

b) Existen dos métodos para calcular el número de átomos por celda unitaria. Utilizando el concepto de red y base,

$$\frac{\text{1 punto de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{\text{5 ion}}{\text{punto de red}} = \frac{\text{5 iones}}{\text{celda unitaria}}$$

Utilizando el concepto de celda unitaria,

$$\frac{\text{8 esquinas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{\text{1/8 ion Ca}}{\text{esquina}} + \frac{\text{1 centrado en el cuerpo}}{\text{celda unitaria}} * \frac{\text{1 ion Ti}}{\text{centrado en el cuerpo}}$$
$$+ \frac{\text{6 centrados en la cara}}{\text{celda unitaria}} * \frac{\text{1/2 O ion}}{\text{centrados en la cara}} = \frac{\text{5 iones}}{\text{celda unitaria}}$$

Como se esperaba, el número de átomos por celda unitaria es el mismo sin que importe cuál método se utilice. La fórmula química de la perovskita es $CaTiO_3$ (titanato de calcio). Se dice que los compuestos con la fórmula general ABO_3 y esta estructura tienen la estructura cristalina de la perovskita. Uno de los polimorfos del titanato de bario, que se usa para fabricar capacitores para aplicaciones electrónicas, y una forma del zirconato de plomo exhiben esta estructura.

c) Si el calcio se localiza en la posición centrada en el cuerpo en vez de situarse en las esquinas de la celda unitaria, entonces el titanio debe localizarse en las esquinas de la celda unitaria y los iones de oxígeno deben ubicarse en los centros de las aristas de la celda unitaria, como se muestra en la figura 3-29. Observe que esto es equivalente al desplazamiento de cada ion en la base dada en el inciso *a*) por el vector [1/2 1/2 1/2]. El ion de Ca se desplaza de (0, 0, 0) a (1/2, 1/2, 1/2) y el ion de Ti se desplaza de (1/2, 1/2, 1/2) a (1, 1, 1), la cual es equivalente al origen de la celda unitaria adyacente o (0, 0, 0). Observe también que no se ha cambiado el cristal; sólo son diferentes las coordenadas de los átomos asentados en la base. Otra descripción de red y base de la perovskita es una red cúbica sencilla con una base de Ca (1/2, 1/2, 1/2), Ti (0, 0, 0) y O (1/2, 0, 0), (0, 1/2, 0) y (0, 0, 1/2).

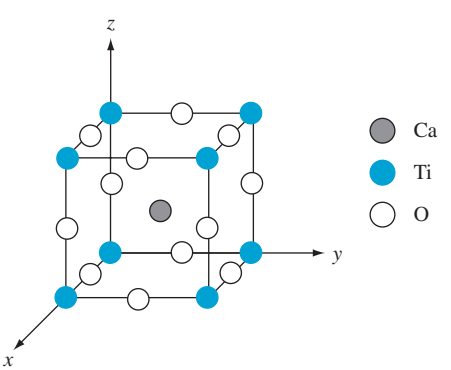


Figura 3-29 Representación alterna de la celda unitaria de la perovskita.

Utilizando el concepto de red y base para contar el número de átomos por celda unitaria,

$$\frac{1 \text{ punto de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{5 \text{ iones}}{\text{punto de red}} = \frac{5 \text{ iones}}{\text{celda unitaria}}$$

Utilizando el concepto de celda unitaria,

$$\frac{1 \text{ centrado en el cuerpo}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1 \text{ ion de Ca}}{\text{centrado en el cuerpo}} + \frac{8 \text{ corners}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/8 \text{ ion de Ti}}{\text{esquina}}$$
$$+ \frac{12 \text{ centrados en las aristas}}{\text{celda unitaria}} * \frac{1/4 \text{ O ion}}{\text{centrado en la arista}} = \frac{5 \text{ iones}}{\text{celda unitaria}}$$

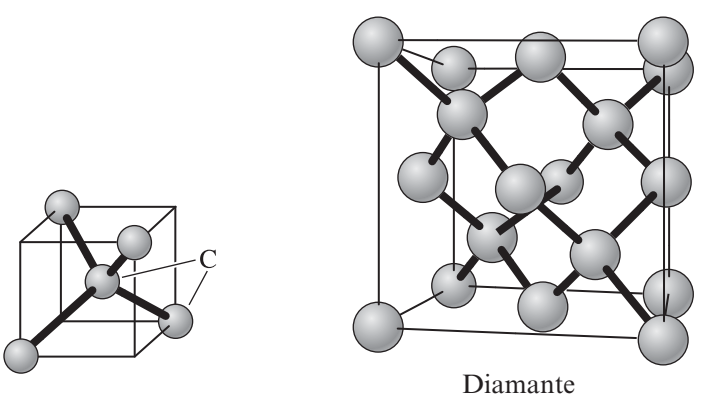
De nuevo se encuentra que la fórmula química es $CaTiO_3$.

3-8 Estructuras covalentes

Con frecuencia, los materiales enlazados de manera covalente tienen estructuras complejas para poder cumplir con las restricciones direccionales impuestas por el enlace.

Estructura cúbica del diamante

Los elementos como el silicio, el germanio (Ge), el α-Sn y el carbono (en su forma de diamante) están enlazados por medio de cuatro enlaces covalentes y producen un **tetraedro** [figura 3-30*a*)]. Si se combinan estos grupos tetraédricos puede construirse un cubo grande [figura 3-30*b*)] que contiene ocho cubos más pequeños del tamaño del cubo tetraédrico. El cubo grande es la celda unitaria **cúbica del diamante** (CD). Los átomos ubicados en las esquinas de los cubos tetraédricos proporcionan los átomos en los puntos de red CCCa regulares. Están presentes cuatro átomos adicionales dentro de la celda unitaria CD resultantes de los átomos en el centro de los cubos tetraédricos. La estructura cristalina CD se puede describir como una red CCCa con dos átomos asociados con cada punto de red (o una base de 2). Por lo tanto, hay ocho átomos por celda unitaria.



a) ***b)***

Figura 3-30 *a*) Tetraedro y *b*) celda unitaria cúbica del diamante (CD). Esta estructura abierta se produce debido a los requerimientos del enlace covalente.

Ejemplo 3-17 *Determinación del factor de empaquetamiento de la estructura cúbica del diamante*

Describa la estructura cúbica del diamante como una red y una base y determine su factor de empaquetamiento.

SOLUCIÓN

La estructura cúbica del diamante es una red cúbica centrada en la cara con una base de dos átomos del mismo tipo ubicados en (0, 0, 0) y (1/4, 1/4, 1/4). El átomo de la base, que se localiza en (0,0,0) justifica los átomos ubicados en los puntos de red CCCa, los cuales son (0, 0, 0), (0, 1/2, 1/2), (1/2, 0, 1/2) y (1/2, 1/2, 0) en términos de las coordenadas de la celda unitaria. Si se suma el vector [1/4, 1/4, 1/4] a cada uno de estos puntos, las cuatro coordenadas atómicas adicionales del interior de la celda unitaria se determinan como (1/4, 1/4, 1/4), (1/4, 3/4, 3/4), (3/4, 1/4, 3/4) y (3/4, 3/4, 1/4). Hay ocho átomos por celda unitaria en la estructura cúbica del diamante:

$$\frac{4 \text{ puntos de red}}{\text{celda unitaria}} * \frac{2 \text{ átomos}}{\text{punto de red}} = \frac{8 \text{ átomos}}{\text{celda unitaria}}$$

Los átomos que se localizan en las posiciones del tipo (1/4, 1/4, 1/4) se encuentran en los centros de los tetraedros que forman los átomos ubicados en los puntos de red CCCa. Los átomos en las posiciones del tipo (1/4, 1/4, 1/4) están en contacto directo con los cuatro átomos circundantes. Considere la distancia entre el centro del átomo localizado en (0, 0, 0) y el centro del átomo ubicado en (1/4, 1/4, 1/4). Esta distancia es igual a un cuarto de la diagonal del cuerpo o a dos radios atómicos, como se muestra en la figura 3-31. Por lo tanto,

$$\frac{a_0\sqrt{3}}{4} = 2r$$

o

$$a_0 = \frac{8r}{\sqrt{3}}$$

El factor de empaquetamiento es la razón del volumen del espacio ocupado por los átomos en la celda unitaria al volumen de la celda unitaria:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(8 \text{ átomos/celda})\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{a_0^3}$$

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(8 \text{ átomos/celda})\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{\left(8r/\sqrt{3}\right)^3}$$

$$\text{Factor de empaquetamiento} = 0.34$$

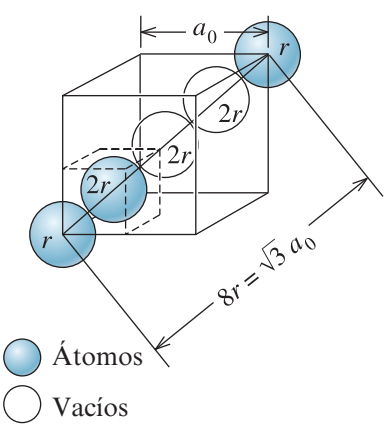


Figura 3-31 Determinación de la relación entre el parámetro de red y el radio atómico en la celda cúbica del diamante (del ejemplo 3-17).

Esta es una estructura relativamente abierta en comparación con las estructuras empaquetadas de manera compacta. En el capítulo 5 aprenderá que la apertura de una estructura es uno de los factores que afecta la velocidad a la que se difunden los distintos átomos en un material dado.

Ejemplo 3-18 *Cálculo del radio, la densidad y la masa atómica del silicio*

La constante de red del Si es de 5.4307 Å. Calcule el radio del átomo de silicio y la densidad teórica del silicio. La masa atómica del Si es de 28.09 g/mol.

SOLUCIÓN

El silicio tiene la estructura cúbica del diamante. Como se muestra en el ejemplo 3-17, en el caso de la estructura cúbica del diamante

$$r = \frac{a_0\sqrt{3}}{8}$$

Por lo tanto, sustituyendo $a_0 = 5.4307$ Å, el radio del átomo de silicio = 1.176 Å. Este es el mismo radio que se muestra en el apéndice B. Para calcular la densidad se utiliza el mismo método que en el ejemplo 3-15. Reconociendo que hay ocho átomos de Si por celda unitaria,

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{8(28.08)/(6.022 \times 10^{23})}{(5.4307 \times 10^{-8}\ \text{cm})^3} = 2.33\ \text{g/cm}^3$$

Este es el mismo valor de la densidad que se presenta en el apéndice A.

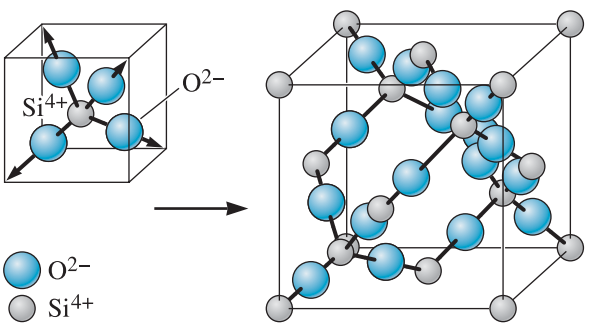


Figura 3-32 El tetraedro silicio-oxígeno y la forma resultante de cristobalita β de la sílice.

Sílice cristalina En varias de sus formas, la sílice (SiO_2) tiene una estructura cerámica cristalina que es parcialmente covalente y parcialmente iónica. La figura 3-32 muestra la estructura cristalina de una de las formas de la sílice, la cristobalita β, una estructura complicada con una red CCCa. Los radios iónicos del silicio y el oxígeno son 0.042 y 0.132 nm, respectivamente, por lo que la razón de los radios es $r_{Si^{4+}}r_{O^{2-}} = 0.318$ y el número de coordinación es cuatro.

Polímeros cristalinos Varios polímeros pueden formar una estructura cristalina. Las líneas punteadas de la figura 3-33 delinean la celda unitaria de la red del polietileno. Este compuesto se obtiene uniendo moléculas de C_2H_4 para producir cadenas de polímeros largas que forman una celda unitaria ortorrómbica. Algunos polímeros, entre ellos el nailon, pueden tener varias formas polimórficas. La mayoría de los plásticos de ingeniería son parcialmente amorfos y pueden desarrollar cristalinidad durante su procesamiento. También es posible hacer crecer monocristales de polímeros.

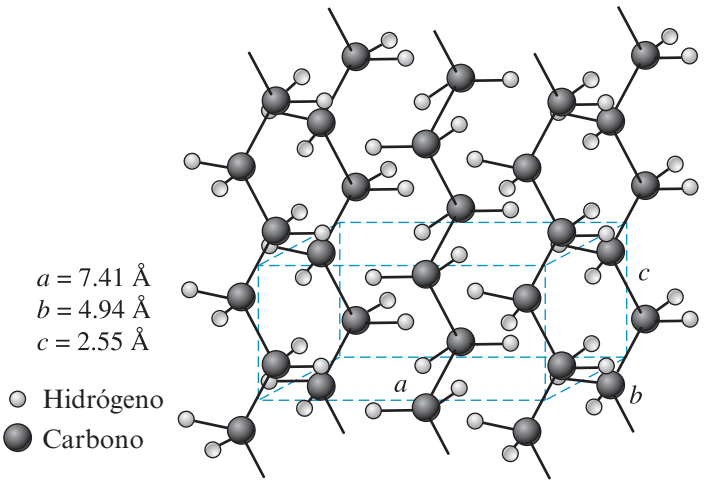


Figura 3-33 Celda unitaria del polietileno cristalino (no está a escala).

3-9 Técnicas de difracción del análisis de estructuras cristalinas

La estructura cristalina de un material cristalino puede analizarse utilizando la **difracción de rayos x (DRX)** o difracción de electrones. Max von Laue (1879-1960) recibió el Premio Nobel en 1914 por su descubrimiento relacionado con la difracción de rayos x por medio de un cristal. William Henry Bragg (1862-1942) y su hijo William Lawrence Bragg (1890-1971) recibieron el Premio Nobel en 1915 por sus contribuciones a la DRX.

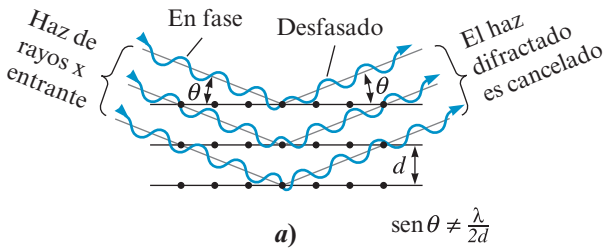
Cuando un haz de rayos x que tiene una sola longitud de onda en el mismo orden de magnitud que el espaciado atómico del material incide sobre este, los rayos x se dispersan en todas las direcciones. La mayor parte de la radiación dispersada de un átomo cancela la radiación dispersada de los otros átomos; sin embargo, los rayos x que inciden sobre ciertos planos cristalográficos a ángulos específicos son reforzados en lugar de ser cancelados. A este fenómeno se le llama **difracción**. Los rayos x son difractados, o el haz es reforzado, cuando las condiciones satisfacen la **ley de Bragg**,

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}} \tag{3-7}$$

donde el ángulo θ es la mitad del ángulo entre el haz difractado y la dirección del haz original, λ es la longitud de onda de los rayos x y d_{hkl} es el espaciado interplanar entre los planos que ocasionan el reforzamiento constructivo del haz (vea la figura 3-34).

Cuando se preparan materiales en la forma de un polvo fino, siempre hay por lo menos unas cuantas partículas de polvo (cristales o agregados de cristales) cuyos planos (*hkl*) están orientados hacia el ángulo apropiado θ para cumplir la ley de Bragg. Por lo tanto, se produce un haz difractado, que forma un ángulo de 2θ con el haz incidente. En un *difractómetro*, un detector de rayos x en movimiento registra los ángulos 2θ hacia los cuales se difracta el haz, lo cual genera un patrón de difracción característico (vea la figura 3-35). Si se conoce la longitud de onda de los rayos x, se pueden determinar los espaciados interplanares y, con el tiempo, la identidad de los planos que ocasionan la difracción. En un instrumento DRX, los rayos x se producen bombardeando un blanco metálico con un haz de electrones de alta energía. Por lo general, los rayos x emitidos por el cobre tienen una longitud de onda $\lambda \cong 1.54060$ Å (línea $K\alpha_1$) por lo que son los que más se utilizan.

Por lo regular, el análisis de DRX puede conducirse con relativa rapidez (~30 minutos a 1 hora por muestra) sobre muestras voluminosas o en polvo sin preparar la muestra de manera extensiva. Esta técnica también puede utilizarse para determinar si el material consiste en muchos granos orientados en una dirección cristalográfica particular (textura) en materiales voluminosos y películas delgadas. Por lo general, un técnico bien entrenado puede conducir el análisis e interpretar con bastante facilidad la información de la difracción del polvo. Como resultado, la DRX se utiliza



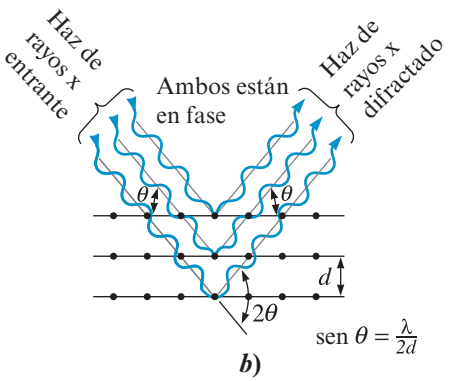
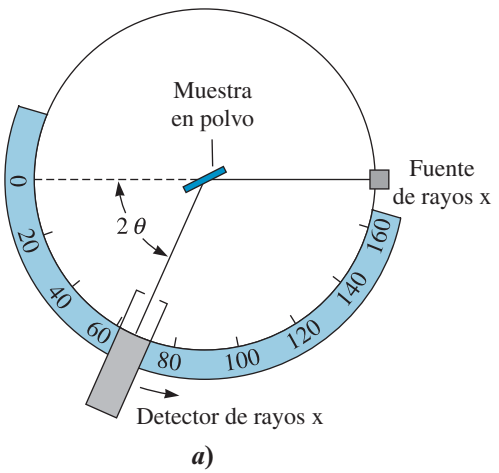


Figura 3-34 *a*) Interacciones destructivas y *b*) interacciones de refuerzo entre los rayos x y el material de línea de cristal. El refuerzo se produce en ángulos que satisfacen la ley de Bragg.



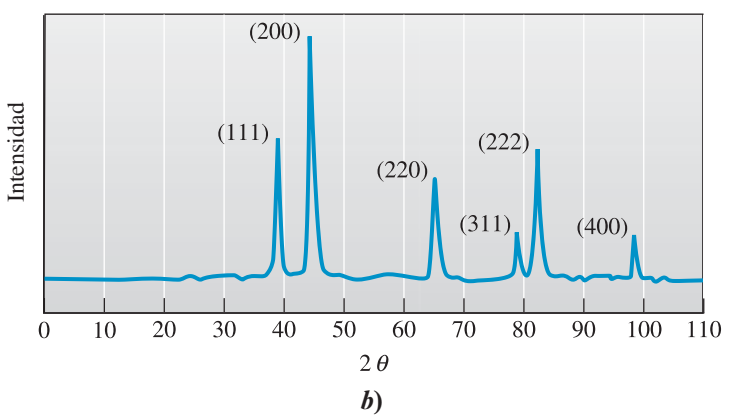


Figura 3-35 *a*) Diagrama de un difractómetro, que presenta la muestra en polvo y los haces incidentes y difractados. *b*) Patrón de difracción que se obtiene a partir de una muestra de polvo de oro.

en varias industrias como una herramienta para propósitos del control de la calidad del producto. El análisis de monocristales y materiales que contienen varias fases puede ser más complicado y requerir más tiempo.

Para identificar la estructura cristalina de un material cúbico se debe observar el patrón de las líneas de difracción, por lo regular creando una tabla de los valores de $\text{sen}^2\theta$. Si se combina la ecuación 3-7 con la ecuación 3-6 del espaciado interplanar, se encuentra que:

$$\text{sen}^2\theta = \frac{\lambda^2}{4a_0^2}(h^2 + k^2 + l^2) \tag{3-8}$$

En los metales cúbicos sencillos se difractan todos los planos posibles, lo que da un patrón $h^2 + k^2 + l^2$ de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 . . . . [Observe que el 7 no está incluido porque no existe una combinación de $h^2 + k^2 + l^2$ que sea igual a 7.] En los metales cúbicos centrados en el cuerpo, la difracción sólo se lleva a cabo a partir de los planos que tienen una suma $h^2 + k^2 + l^2$ de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, ... En el caso de los metales cúbicos centrados en la cara, ocurre la interferencia más destructiva y se difractarán los planos que tienen sumas $h^2 + k^2 + l^2$ de 3, 4, 8, 11, 12, 16, ... Cuando se calculan los valores de $\text{sen}^2\theta$ y después se encuentra el patrón apropiado, se puede determinar la estructura cristalina de los metales que tienen una de estas estructuras sencillas, como se ilustra en el ejemplo 3-19.

Ejemplo 3-19 *Análisis de la información de la difracción de rayos x*

Los resultados de un experimento de difracción de rayos x utilizando rayos x con $\lambda = 0.7107$ Å [radiación que se obtiene a partir de un blanco de molibdeno (Mo)] muestran que los picos de la difracción ocurren en los siguientes ángulos 2θ:

Pico	2θ (°)	Pico	2θ (°)
1	20.20	5	46.19
2	28.72	6	50.90
3	35.36	7	55.28
4	41.07	8	59.42

Determine la estructura cristalina, los índices del plano que produce cada pico y el parámetro de red del material.

SOLUCIÓN

Se puede determinar primero el valor de $\text{sen}^2\theta$ de cada pico, después dividir entre el denominador más bajo, 0.0308.

Pico	2θ (°)	$\text{sen}^2\theta$	$\text{sen}^2\theta/0.0308$	$h^2 + k^2 + l^2$	(hkl)
1	20.20	0.0308	1	2	(110)
2	28.72	0.0615	2	4	(200)
3	35.36	0.0922	3	6	(211)
4	41.07	0.1230	4	8	(220)
5	46.19	0.1539	5	10	(310)
6	50.90	0.1847	6	12	(222)
7	55.28	0.2152	7	14	(321)
8	59.42	0.2456	8	16	(400)

Cuando se sigue este procedimiento, se encuentra un patrón de valores de $\text{sen}^2\theta$ /0.0308 de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Si el material fuera cúbico sencillo, el 7 no estaría presente, debido a que ningún plano tiene un valor de $h^2 + k^2 + l^2$ de 7. Por lo tanto, el patrón en realidad debe ser 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, . . . y el material debe ser cúbico centrado en el cuerpo. Los valores de (hkl) que se incluyen en la lista dan estos valores de $h^2 + k^2 + l^2$ requeridos.

Se pueden usar entonces los valores de 2θ de cualquiera de los picos para calcular el espaciado interplanar, y por lo tanto el parámetro de red. Al seleccionar el pico 8:

$$2\theta = 59.42° \quad \text{o} \quad \theta = 29.71°$$

$$d_{400} = \frac{\lambda}{2\text{sen}\,\theta} = \frac{0.7107}{2\text{sen}(29.71°)} = 0.71699 \text{ Å}$$

$$a_0 = d_{400}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} = (0.71699 \text{ Å})(4) = 2.868 \text{ Å}$$

Este es el parámetro de red del hierro cúbico centrado en el cuerpo.

Difracción y microscopía de electrones

Louis de Broglie teorizó que los electrones se comportan como ondas. En la difracción de electrones se hace uso de electrones de alta energía (~100,000 a 400,000 eV). Estos electrones son difractados de las muestras electrónicas transparentes de los materiales. El haz de electrones que sale de la muestra también se utiliza para formar una imagen de ella. Por lo tanto, el microscopio electrónico de transmisión y la difracción de electrones se utilizan con el fin de obtener imágenes de las características microestructurales y para determinar las estructuras cristalinas.

¡Un electrón de 100,000 eV tiene una longitud de onda de alrededor de 0.004 nm! Esta longitud de onda ultrapequeña de electrones de alta energía permite que un **microscopio electrónico de transmisión** (**MET**) tome imágenes de forma simultánea de la microestructura a una escala muy pequeña. Si la muestra es muy gruesa, los electrones no pueden transmitirse a través de ella y no se observará una imagen o un patrón de difracción. Por lo tanto, en la microscopía electrónica de transmisión y en la difracción de electrones la muestra tiene que prepararse de tal manera que sus porciones sean transparentes para los electrones. La figura 3-36 muestra una imagen del MET y un patrón de difracción de electrones de un área de una muestra de una aleación de aluminio. Los puntos brillantes grandes corresponden a los granos de la matriz. Los puntos más pequeños son originados por los cristales pequeños de otra fase.

Otra ventaja del uso de un MET es la alta resolución espacial. Cuando se usa un MET es posible determinar las diferencias entre las distintas regiones cristalinas y entre las regiones amorfas y cristalinas a escalas de longitudes muy pequeñas (~1-10 nm). Esta técnica de análisis y sus variaciones (por ejemplo, la microscopía electrónica de alta resolución (MEAR), la microscopía electrónica de transmisión de barrido (METB), etc.) también se utilizan para determinar la orientación de los distintos granos y otras características microestructurales que se explican en capítulos posteriores.

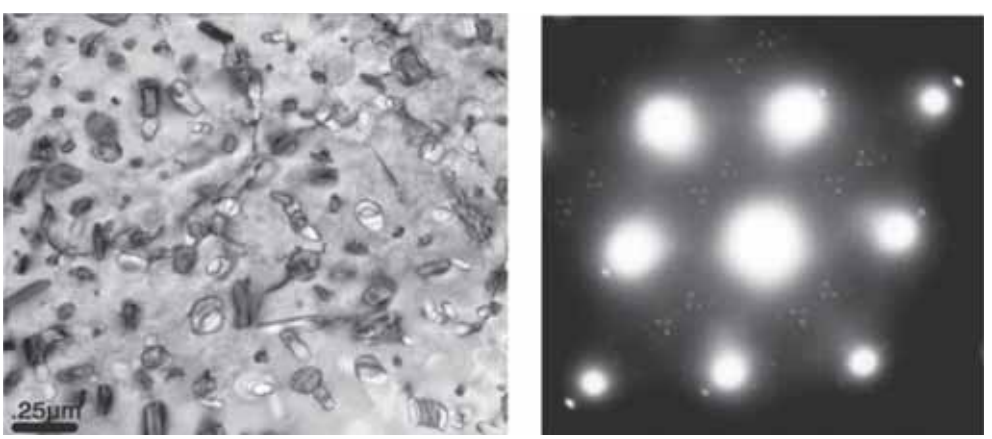


Figura 3-36 Micrografía de un MET de una muestra de una aleación de aluminio (Al-7055). El patrón de difracción a la derecha muestra puntos brillantes grandes que representan la difracción de los granos de la matriz de aluminio principal. Los puntos más pequeños son originados por los cristales a nanoescala de otro compuesto que está presente en la aleación de aluminio. (*Cortesía del doctor Jörg M. K. Wiezorek, University of Pittsburgh.*)

Las características avanzadas y especializadas asociadas con el MET también permiten el mapeo químico de los elementos de un material dado. Algunas de las desventajas asociadas con el MET incluyen

a) el tiempo que consume la preparación de las muestras para que sean casi transparentes al haz de electrones;

b) la cantidad considerable de tiempo y la habilidad que se requiere para analizar la información de una muestra delgada tridimensional que está representada en una imagen bidimensional y en el patrón de difracción;

c) sólo se examina un volumen muy pequeño de la muestra, y

d) el equipo es relativamente caro y requiere de mucho cuidado en su uso.

En general, el MET se ha convertido en un método de investigación ampliamente utilizado y aceptado para el análisis de las características microestructurales a escalas de longitud micro y nano.

Resumen

- Los átomos o iones pueden arreglarse en los materiales sólidos en un orden de corto o largo alcances.
- Los materiales amorfos, como los vidrios de silicato, los vidrios metálicos, el silicio amorfo y muchos polímeros, sólo tienen un orden de corto alcance. Dichos materiales se forman cuando la cinética de un proceso involucrado en su fabricación no permite que los átomos o iones asuman las posiciones de equilibrio. Con frecuencia, estos materiales presentan inusuales propiedades nuevas.
- Los materiales cristalinos, entre ellos los metales y varias cerámicas, tienen orden de corto y largo alcances. La periodicidad de largo alcance de estos materiales está descrita por su estructura cristalina.
- Los arreglos atómicos o iónicos de los materiales cristalinos son descritos por siete sistemas cristalinos generales, los cuales incluyen 14 redes de Bravais específicas. Entre los ejemplos se incluyen las redes cúbica sencilla, cúbica centrada en el cuerpo, cúbica centrada en la cara y hexagonal.
- Una red es un conjunto de puntos organizados de manera única. La base o motivo se relaciona con uno o más átomos asociados con cada punto de red. Una estructura cristalina está definida por la combinación de una red y una base. Aunque sólo existen 14 redes de Bravais, existen cientos de estructuras cristalinas.
- Una estructura cristalina se caracteriza por medio de los parámetros de red de la celda unitaria, la cual es la subdivisión más pequeña de la estructura cristalina que sigue describiendo la red. Otras características incluyen el número de puntos de red y los átomos por celda unitaria, el número de coordinación (o número de vecinos más cercanos) de los átomos localizados en la celda unitaria y el factor de empaquetamiento de estos en dicha celda.
- Los materiales alotrópicos, o polimórficos, tienen más de una estructura cristalina posible. En gran medida, las propiedades de los materiales pueden depender del tipo de polimorfo o alótropo en particular.
- Los átomos de los metales que tienen estructuras cristalinas cúbicas centradas en la cara y compactas hexagonales están arreglados de tal manera que ocupan las mayor fracción del espacio. Las estructuras CCCa y CH logran el empaquetamiento más compacto por medio de distintas secuencias de apilamiento de los planos compactos de los átomos.
- La mayor fracción de empaquetamiento posible con esferas de un tamaño es 0.74 y es independiente del radio de las esferas (es decir, los átomos y los balones de basquetbol se empacan con la misma eficiencia siempre que se traten con un radio constante de un átomo y un tamaño fijo del balón).
- Los puntos, las direcciones y los planos dentro de la estructura cristalina pueden identificarse de manera formal por medio de la asignación de sus coordenadas y sus índices de Miller.

- Las propiedades mecánicas, magnéticas, ópticas y dieléctricas pueden diferir cuando se miden a lo largo de direcciones o planos distintos dentro de un cristal; en este caso, se dice que el cristal es anisotrópico. Si las propiedades son idénticas en todas las direcciones, el cristal es isotrópico. El efecto de la anisotropía cristalográfica puede estar enmascarado en un material cristalino debido a la orientación aleatoria de los granos.
- Los sitios intersticiales, u orificios entre los átomos normales de una estructura cristalina, pueden ser llenados por otros átomos o iones. La estructura cristalina de varios materiales cerámicos puede comprenderse si se considera cómo están ocupados estos sitios. Los átomos o iones localizados en los sitios intersticiales desempeñan una función importante en el reforzamiento de los materiales, pues influyen en sus propiedades físicas y controlan su procesamiento.
- Las estructuras cristalinas de muchos materiales iónicos están formadas por el empaquetamiento de aniones [por ejemplo, iones oxígeno (O^{2-})]. Los cationes entran en el poliedro de coordinación formado por los aniones. Por lo regular, estos poliedros comparten esquinas y generan estructuras cristalinas. Las condiciones de neutralidad de la carga y la estequiometría tienen que estar balanceadas. Las estructuras cristalinas de muchos materiales cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3, ZrO_2) pueden racionalizarse a partir de estas cuestiones.
- Las estructuras cristalinas de los materiales enlazados de manera covalente tienden a ser abiertas. Entre algunos ejemplos se incluyen la cúbica del diamante (por ejemplo, Si, Ge).
- La DRX y la difracción de electrones se utilizan para determinar la estructura cristalina de los materiales cristalinos. La microscopía electrónica de transmisión también puede emplearse para obtener imágenes de las características microestructurales de los materiales a escalas de longitud más pequeñas.

Glosario

Alotropía Característica de un elemento que puede existir en más de una estructura cristalina, lo cual depende de la temperatura y la presión.

Anisotrópico Que tiene propiedades diferentes en direcciones distintas.

Base Grupo de átomos asociados con un punto de red (lo mismo que el motivo).

Celda unitaria Subdivisión de la red que mantiene las características generales de la red completa.

Conjetura de Kepler Conjetura de Johannes Kepler que, en 1611, estableció que la fracción de empaquetamiento máxima con esferas de tamaño uniforme no podía exceder de $\pi/\sqrt{18}$.

Cristales líquidos Materiales poliméricos que por lo general son amorfos, pero que pueden que pueden adquirir características parcialmente cristalinas cuando se les aplica un campo eléctrico externo. El efecto del campo eléctrico es reversible.

Cristalización Proceso responsable de la formación de cristales, por lo general en un material amorfo.

Cristalización inducida por un esfuerzo Proceso de formación de cristales por medio de la aplicación de un esfuerzo externo.

Cristalografía Estudio formal de los arreglos de los átomos en los sólidos.

Cúbica del diamante (CD) Estructura cristalina cúbica del carbono, silicio y otros materiales enlazados de manera covalente.

Defecto Característica microestructural que implica una interrupción en el arreglo periódico perfecto de los átomos/iones de un material cristalino.

Defectos a nivel atómico Defectos como vacancias, dislocaciones, etc., que ocurren a una escala de longitud comparable a unas cuantas distancias interatómicas.

Densidad Masa por unidad de volumen de un material, por lo regular en unidades de g/cm^3.

Densidad lineal Número de puntos de red por unidad de longitud a lo largo de una dirección.

Densidad planar Número de átomos por unidad de área cuyos centros se encuentran en el plano.

Difracción Interferencia, o reforzamiento constructivo de un haz de rayos x o electrones que interacciona con un material.

Difracción de electrones Método para determinar el nivel de cristalinidad a escalas de longitud relativamente pequeñas. Por lo general se lleva a cabo con un microscopio electrónico de transmisión.

Difracción de rayos x Técnica para analizar materiales cristalinos por medio de un haz de rayos x.

Direcciones compactas Direcciones en un cristal a lo largo de las cuales los átomos están en contacto.

Direcciones de una forma o direcciones de una familia Direcciones cristalográficas que tienen las mismas características. Se denotan por corchetes angulares <> .

Distancia repetitiva Distancia de un punto de red al punto de red adyacente a lo largo de una dirección.

Espaciado interplanar Distancia entre dos planos paralelos adyacentes con los mismos índices de Miller.

Estructura compacta Estructuras que muestran una fracción de empaquetamiento de 0.74 (CCCa y CH).

Estructura cristalina Arreglo de átomos en un material en una red repetitiva regular. Una estructura cristalina se describe por medio de una red y una base.

Factor de empaquetamiento Fracción de espacio en una celda unitaria ocupada por átomos.

Grano Cristal pequeño en un material policristalino.

Índices de Miller Notación abreviada para describir ciertas direcciones y planos cristalográficos de una celda unitaria.

Índices de Miller-Bravais Notación abreviada especial para describir los planos cristalográficos de las celdas unitarias compactas hexagonales.

Isotrópico Que tiene las mismas propiedades en todas las direcciones.

Ley de Bragg Relación que describe el ángulo al cual un haz de rayos x de una longitud de onda particular se difracta de los planos cristalográficos de un espaciado interplanar dado.

Límites de grano Regiones entre los granos de un material policristalino.

Material policristalino Material que consiste en muchos granos.

Materiales amorfos Materiales, incluidos los vidrios, que no tienen orden de largo alcance o estructura cristalina.

Materiales cristalinos Materiales que consisten en uno o muchos cristales o granos pequeños.

Microscopía electrónica de transmisión Técnica para obtener imágenes y analizar microestructuras por medio de un haz electrónico de alta energía.

Moldeado de estirado-soplado Proceso que se utiliza para formar botellas de plástico.

Motivo Grupo de átomos afiliados con un punto de red (lo mismo que la base).

Número de coordinación Número de vecinos más cercanos a un átomo en su arreglo atómico.

Orden de corto alcance Arreglo regular y predecible de los átomos en un distancia corta, por lo general de uno o dos espaciados atómicos.

Orden de largo alcance Arreglo repetitivo regular de átomos en un material sólido que se extiende sobre escalas de distancias de ~10nm o superiores.

Parámetros de red Longitudes de los lados de la celda unitaria y los ángulos entre ellos.

Plano basal Nombre especial dado al plano compacto de las celdas unitarias compactas hexagonales.

Planos de una forma o planos de una familia Planos cristalográficos que tienen las mismas características, aunque sus orientaciones son distintas. Se denotan por medio de llaves {}.

Polimorfismo Compuestos que exhiben más de un tipo de estructura cristalina, lo cual depende de la temperatura y la presión.

Puntos de red Puntos que constituyen la red. Los entornos de cada punto de red son idénticos.

Radio atómico Radio aparente de un átomo, que por lo general se calcula a partir de las dimensiones de la celda unitaria, utilizando direcciones compactas (depende del número de coordinación).

Red Colección de puntos que divide el espacio en segmentos menores de igual tamaño.

Redes de Bravais Las 14 redes posibles que pueden crearse en tres dimensiones utilizando los puntos de red.

Secuencia de apilamiento Secuencia en la que se apilan los planos compactos. Si la secuencia es *ABABAB*, se produce una celda unitaria compacta hexagonal; si la secuencia es *ABCABCABC*, se produce una estructura cúbica centrada en la cara.

Sistemas cristalinos Arreglos cúbicos, tetragonales, ortorrómbicos, hexagonales, monoclínicos, romboédricos y triclínicos de puntos en el espacio que conducen a las 14 redes de Bravais y a cientos de estructuras cristalinas.

Sitio cúbico Posición intersticial cuyo número de coordinación es ocho.

Sitio octaédrico Posición intersticial cuyo número de coordinación es seis.

Sitio tetraédrico Posición intersticial cuyo número de coordinación es cuatro.

Sitios intersticiales Localizaciones entre los átomos o iones "normales" de un cristal en las que se coloca otro átomo o ion, por lo general distinto. A menudo, el tamaño de esta ubicación intersticial es menor que el átomo o ion que se va a introducir.

Solidificación rápida Técnica que se utiliza para enfriar metales y aleaciones de manera muy rápida.

Vidrio metálico Metales o aleaciones amorfos que se obtienen por medio de la solidificación rápida.

Vidrios Materiales sólidos no cristalinos (por lo regular derivados a partir del estado fundido) cuyo orden atómico sólo es de corto alcance.

Problemas

Sección 3-1 Orden de corto alcance frente a orden de largo alcance

Sección 3-2 Materiales amorfos: Principios y aplicaciones tecnológicas

3-1 ¿Qué es un material "cristalino"?

3-2 ¿Qué es un monocristal?

3-3 Enuncie dos aplicaciones cualesquiera donde se usen monocristales.

3-4 ¿Qué es un material policristalino?

3-5 ¿Qué es un material de cristal líquido?

3-6 ¿Qué es un material amorfo?

3-7 ¿Por qué algunos materiales asumen una estructura amorfa?

3-8 Explique cómo es posible que una sustancia presente orden de corto plazo pero no de largo plazo.

3-9 ¿Una aleación puede existir tanto en forma cristalina como amorfa?

3-10 ¿Cuántos granos se observan aproximadamente en la figura 3-2*b*)?

Sección 3-3 Red, base, celdas unitarias y estructuras cristalinas

3-11 Defina los términos red, celda unitaria, base y estructura cristalina.

3-12 Enumere los siete sistemas cristalinos y los tipos de red de Bravais asociadas a cada grupo.

3-13 Explique por qué no existe la red de Bravais tetragonal centrada en la cara.

3-14 Calcule el radio atómico en cm de los siguientes materiales:
a) un metal CCCu con $a_0 = 0.3294$ nm y
b) un metal CCCa con $a_0 = 4.0862$ Å.

3-15 Calcule el parámetro de red de cada uno de los siguientes elementos con base en su radio atómico: *a*) hierro *b*) aluminio *c*) cobre *d*) magnesio

3-16 Determine la estructura cristalina de los siguientes materiales:
a) un metal con $a_0 = 4.9489$ Å, *r* 5 1.75 Å y un átomo por punto de red y
b) un metal con $a_0 = 0.42906$ nm, $r = 0.1858$ nm y un átomo por punto de red.

3-17 La densidad del potasio, cuya estructura es CCCu, es de 0.855 g/cm^3, y su peso atómico es de 39.09 g/mol. Calcule
a) el parámetro de red y
b) el radio atómico del potasio.

3-18 La densidad del torio, cuya estructura es CCCa, es de 11.72 g/cm^3, y su peso atómico es de 232 g/mol. Calcule
a) el parámetro de red y
b) el radio atómico del torio.

3-19 Un metal tiene una estructura cúbica con una densidad de 2.6 g/cm^3, un peso atómico de 87.62 g/mol y un parámetro de red de 6.0849 Å. Un átomo está asociado con cada punto de red. Determine la estructura cristalina del metal.

3-20 Un metal tiene una estructura cúbica con una densidad de 1.892 g/cm^3, un peso atómico de 132.91 g/mol y un parámetro de red de 6.13 Å. Un átomo está asociado con cada punto de red. Determine la estructura cristalina del metal.

3-21 El indio tiene una estructura tetragonal, con $a_0 = 0.32517$ nm y $c_0 = 0.49459$ nm. Su densidad es de 7.286 g/cm^3 y el peso atómico es de 114.82 g/mol. Este elemento, ¿tiene la estructura tetragonal sencilla o la tetragonal centrada en el cuerpo?

3-22 El bismuto tiene una estructura hexagonal, con $a_0 = 0.4546$ nm y $c_0 = 1.186$ nm. Su densidad es de 9.808 g/cm^3 y su peso atómico es de 208.98 g/mol. Determine
a) el volumen de la celda unitaria y
b) el número de átomos en cada celda unitaria.

3-23 El galio tiene una estructura ortorrómbica, con $a_0 = 0.45258$ nm, $b_0 = 0.45186$ nm y $c_0 = 0.76570$ nm. El radio atómico es de 0.1218 nm. Su densidad es de 5.904 g/cm^3 y su peso atómico de 69.72 g/mol. Determine
a) el número de átomos en cada celda unitaria y
b) el factor de empaquetamiento en la celda unitaria.

3-24 El berilio tiene una estructura cristalina hexagonal, con $a_0 = 0.22858$ nm y $c_0 = 0.35842$ nm.

Su radio atómico es de 0.1143 nm, su densidad de 1.848 g/cm^3 y su peso atómico de 9.01 g/mol. Determine

a) el número de átomos en cada celda unitaria y

b) el factor de empaquetamiento en la celda unitaria.

3-25 Un clip de papel típico, conformado por hierro CCCu, pesa 0.59 g. Calcule

a) el número de celdas unitarias y

b) el número de átomos de hierro que contiene. (Vea el apéndice A para obtener la información que se le pide.)

3-26 La hoja de aluminio que se utiliza para envolver alimentos es de aproximadamente 0.0025 cm de grosor. Suponga que todas las celdas unitarias del aluminio están arregladas de tal manera que a_0 es perpendicular a la superficie de la hoja. Para un cuadrado de 10 cm $\times$ 10 cm de la hoja, determine

a) el número total de celdas unitarias del papel y

b) el grosor de la hoja en número de celdas unitarias. (Vea el apéndice A.)

3-27 El sodio tiene una estructura cúbica cristalina centrada en el cuerpo con un parámetro de red (longitud axial) de 4.2906×10^{-8} cm.

a) Calcule la densidad de la masa (g/cm^3) del sodio.

b) Calcule el radio atómico de un átomo de sodio de estructura cristalina centrada en el cuerpo con base en el modelo de la esfera dura.

3-28 Calcule la densidad del zinc (CH) si la razón *c*/*a* es de 1.856 y $r = 0.332$Å.

3-29 El torio y el dióxido de torio pueden describirse como redes centradas en la cara con una base de Th (0,0,0) y O(1/4, ¼, ¼) y O(1/4, ¼, ¼). Ambos son materiales radioactivos. Por lo general, el dióxido de torio se emplea en electrodos de tungsteno para soldaduras por arco. El torio mejora las propiedades de los electrodos a altas temperaturas y promueve la emisión de electrones en la punta del electrodo.

a) ¿Cuántos átomos de cada tipo hay en una celda unitaria convencional de dióxido de torio?

b) ¿Es esto consistente con la fórmula química del dióxido de torio? Explique su respuesta.

c) ¿Cuál es el número de coordinación (número de vecinos cercanos) de cada átomo de Th?

d) ¿Cuál es el número de coordinación (número de vecinos cercanos) de cada átomo de O?

e) ¿Qué tipo de sitio intersticial ocupan los átomos de oxígeno?

3-30 El zinc tiene una estructura cristalina hexagonal compacta. Sus parámetros de red son $a = 0.26648$ nm y $c = 0.49479$nm y su radio atómico es de 0.1332 nm. *Observe que el zinc no tiene un factor de empaquetamiento atómico ideal.*

a) ¿Cuál es el número de átomos por celda unitaria en la estructura cristalina hexagonal compacta?

b) Determine el factor de empaquetamiento de la celda unitaria del Zn.

c) ¿Es la razón *c*/*a* del zinc mayor o menor que la ideal del CH? ¿El deslizamiento sería más fácil o difícil en comparación con la estructura CH ideal? Explique a detalle su respuesta.

3-31 El rutilo es el nombre dado a una estructura cristalina que por lo general adoptan los compuestos de la forma AB_2, donde A representa un átomo de un metal y B átomos de oxígeno. Una forma del rutilo tiene átomos del elemento A en las coordenadas de la celda unitaria (0, 0, 0) y (1/2, 1/2, 1/2) y átomos del elemento B en (1/4, 1/4, 0), (3/4, 3/4, 0), (3/4, 1/4, 1/2) y (1/4, 3/4, 1/2). Los parámetros de la celda unitaria son $a = b \neq c$ y $a = b = \gamma = 90°$. Observe que, por lo general, el parámetro de red *c* es menor que los parámetros de red *a* y *b* de la estructura del rutilo.

a) ¿Cuántos átomos del elemento A hay en cada celda unitaria?

b) ¿Cuántos átomos del elemento B hay en cada celda unitaria?

c) Su respuesta al inciso *b*), ¿es consistente con la estequiometría de un compuesto AB_2? Explique su respuesta.

d) Dibuje la celda unitaria del rutilo. Utilice un símbolo distinto para cada tipo de átomo. Inserte una leyenda que señale qué símbolo representa a qué tipo de átomo.

e) En una red tetragonal sencilla, $a = b \neq c$ y $\alpha = \beta = \gamma = 90°$. Hay un punto de red en cada celda unitaria localizado en las esquinas de la red tetragonal sencilla. Describa la estructura del rutilo como una red tetragonal sencilla y una base.

3-32 Considere la estructura cristalina del CuAu. Puede describirse como una red cúbica sencilla con una base de Cu (0, 0, 0), Cu (1/2, 1/2, 0), Au (1/2, 0, 1/2) y Au (0, 1/2, 1/2).

a) ¿Cuántos átomos de cada tipo hay en cada celda unitaria?

b) Dibuje la celda unitaria del CuAu. Utilice un símbolo distinto para cada tipo de átomo. Inserte una leyenda que indique qué símbolo representa a qué tipo de átomo.

c) Elabore una representación de red y una base alterna del CuAu para la que un átomo de la base sea Au (0, 0, 0).

d) Una estructura cristalina relacionada es la del Cu_3Au. Esta celda unitaria es similar a la celda unitaria cúbica centrada en la cara con el Au en las esquinas de la celda unitaria y Cu en todas las posiciones centradas en la cara. Describa la estructura como una red y una base.

e) La estructura cristalina del Cu_3Au es similar a la estructura cristalina CCCa, pero no tiene la red cúbica centrada en la cara. Explique de manera breve a qué se debe este fenómeno.

3-33 Los nanoalambres son alambres de metal o semiconductores con una razón dimensional alta con diámetros del orden de 1 a 100 nanómetros y longitudes comunes de 1 a 100 micrones. Los nanoalambres probablemente se ocupen en el futuro para crear circuitos electrónicos de alta densidad.

Los nanoalambres pueden fabricarse a partir de ZnO. El ZnO tiene la estructura de la wurtzita, una red hexagonal con cuatro átomos por punto de red en Zn (0, 0, 0), Zn (2/3, 1/3, 1/2), O (0, 0, 3/8) y O (2/3, 1/3, 7/8).

a) ¿Cuántos átomos hay en la celda unitaria convencional?

b) Si los átomos se localizaran en Zn (0, 0, 0), Zn (1/3, 2/3, 1/2), O (0, 0, 3/8) y O (1/3, 2/3, 7/8), ¿sería diferente la estructura? Explique su respuesta.

c) En el caso del ZnO, los parámetros de celda unitaria son $a = 3.24$ Å y $c = 5.19$ Å. (*Nota*: Esta no es la razón *c*/*a* CH ideal.) Un nanoalambre de ZnO común es de 20 nm de diámetro y 5 mm de largo. Suponga que los nanoalambres son cilíndricos. ¿Aproximadamente cuántos átomos hay en un nanoalambre sencillo de ZnO?

3-34 Calcule la fracción de empaquetamiento atómico de la estructura cristalina compacta hexagonal en la que $c = \left(\sqrt{\frac{8}{3}}\right)a$. Recuerde que la base de la celda unitaria es un paralelogramo.

3-35 El magnesio tiene una estructura cristalina hexagonal compacta. Sus parámetros de red son $a = 0.32087$ nm y $c = 0.5209$nm y un radio atómico de 0.1604 nm. *Observe que el magnesio no tiene un factor de empaquetamiento atómico ideal.*

d) ¿Cuál es el número de átomos en cada celda unitaria en la estructura hexagonal compacta?

e) Determine el factor de empaquetamiento atómico de la celda unitaria de Mg.

f) ¿Es la razón *c*/*a* del Mg mayor o menor que la CH ideal? ¿El deslizamiento será más fácil o difícil en comparación con la estructura CH ideal? Explique con detalle su respuesta.

Sección 3-4 Transformaciones alotrópicas y polimórficas

3-36 ¿Cuál es la diferencia entre un alótropo y un polimorfo?

3-37 ¿Cuáles son los diferentes polimorfos de la zirconia?

3-38 Varios metales se someten a una transformación alotrópica de una estructura cristalina a otra con una temperatura específica. En general, hay un cambio de volumen que acompaña a la transformación. ¿Cuál es el significado práctico de estos datos?

3-39 Arriba de los 882°C, el titanio tiene una estructura cristalina CCCu, con $a = 0.332$ nm. A una temperatura inferior, el titanio tiene una estructura CH con $a = 0.29503$ nm y $c = 0.46831$ nm. Determine el cambio porcentual de volumen cuando el titanio CCCu se transforma en titanio CH. ¿Se produce una contracción o una expansión?

3-40 El Mn-α tiene una estructura cúbica con $a_0 = 0.8931$ nm y una densidad de 7.47 g/cm^3. El Mn-β tiene una estructura cúbica con $a_0 = 0.6326$ nm y una densidad de 7.26 g/cm^3. El peso atómico del manganeso es de 54.938 g/mol y su radio atómico es de 0.112 nm. Determine el cambio porcentual de volumen que ocurriría si se transformara el Mn-α en Mn-β.

3-41 Calcule la densidad teórica de los tres polimorfos de la zirconia. Las constantes de red de la forma monoclínica son $a = 5.156$, $b = 5.191$ y $c = 5.304$ Å, respectivamente. El ángulo β de la celda unitaria monoclínica mide 98.9°. Las constantes de red de la celda unitaria tetragonal son $a = 5.094$ y $c = 5.304$ Å, respectivamente. La zirconia cúbica tiene una constante de red de 5.124 Å. Cada celda unitaria contiene cuatro unidades de fórmula de ZrO_2.

3-42 A partir de la información en este capítulo, calcule el cambio de volumen que ocurrirá cuando se transforma la forma cúbica de la zirconia en la forma tetragonal.

3-43 La zirconia monoclínica no puede utilizarse de manera eficaz para fabricar sensores de oxígeno u otros dispositivos. Explique a qué se debe ello.

3-44 ¿Qué significa el término zirconia estabilizada?

3-45 Enuncie dos aplicaciones cualesquiera de las cerámicas de zirconia estabilizada.

Sección 3-5 Puntos, direcciones y planos de la celda unitaria

3-46 Explique la importancia de las direcciones cristalográficas con base en un ejemplo de una aplicación.

3-47 ¿Por qué las aleaciones de Fe-Si que se utilizan en aplicaciones magnéticas tienen "grano orientado"?

3-48 ¿Cómo influye la dirección cristalográfica en las propiedades magnéticas que se utilizan en materiales aplicados a medios de grabación magnética?

3-49 Determine los índices de Miller de las direcciones en los siguientes puntos: *a*) de (1,0,2) a (2,4,1); *b*) de (2,1,3) a (5,4,2) y *c*) de (3,1,3) a (9,1,5).

3-50 Indique las direcciones de *a*) [111], *b*) [025] y *c*) [414] en una celda unitaria.

3-51 Determine los índices de Miller de las direcciones en la celda unitaria cúbica que se muestra en la figura 3-37.

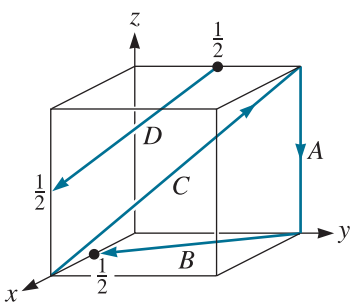


Figura 3-37 Direcciones en la celda unitaria cúbica (problema 3-5).

3-52 Determine los índices de las direcciones en la celda unitaria cúbica que se muestra en la figura 3-38.

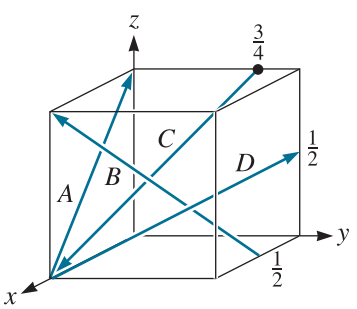


Figura 3-38 Direcciones en la celda unitaria cúbica (problema 3-52).

3-53 Indique los planos de *a*) (100), *b*) (134) y *c*) (101) en una celda unitaria.

3-54 Determine los índices de los planos en la celda unitaria cúbica que se muestra en la figura 3-39.

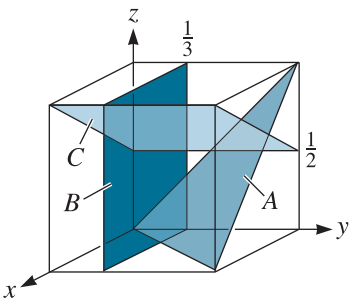


Figura 3-39 Planos en la celda unitaria cúbica (problema 3-54).

3-55 Determine los índices de los planos en la celda unitaria cúbica que se muestra en la figura 3-40.

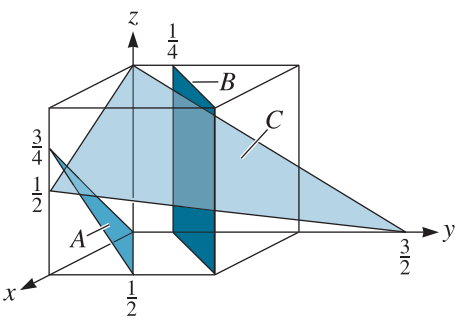


Figura 3-40 Planos de la celda unitaria cúbica (problema 3-55).

3-56 Determine los índices de las direcciones de la red hexagonal que se muestra en la figura 3-41, utilizando los sistemas de tres y cuatro dígitos.

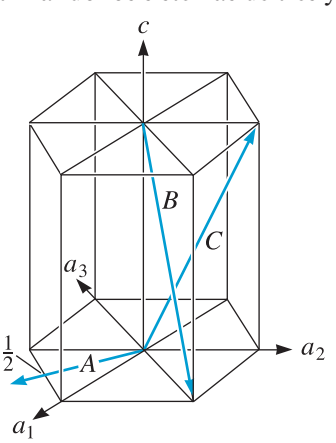


Figura 3-41 Direcciones en la red hexagonal (problema 3-56).

3-57 Determine los índices de los planos de la red hexagonal que se muestra en la figura 3-42, utilizando los sistemas de tres y cuatro dígitos.

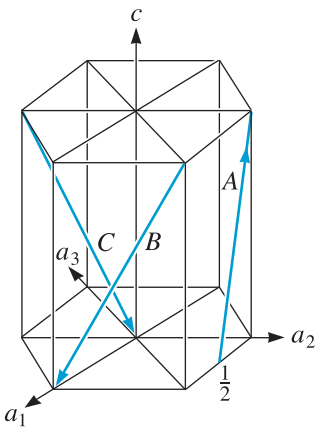


Figura 3-42 Direcciones de una red hexagonal (problema 3-57).

3-58 Determine los índices de los planos de la red hexagonal que se muestra en la figura 3-43.

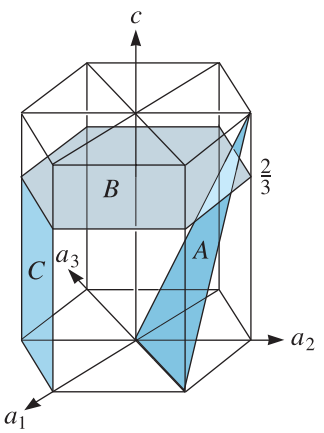


Figura 3-43 Planos de una red hexagonal (problema 3-58).

3-59 Determine los índices de los planos de la red hexagonal que se muestra en la figura 3-44.

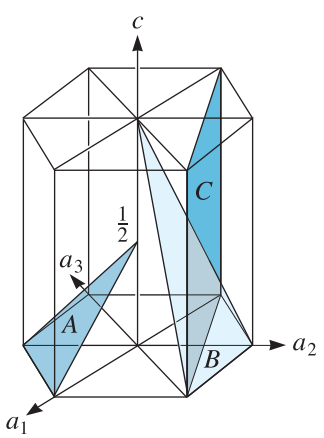


Figura 3-44 Planos en una red hexagonal (problema 3-59).

3-60 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria cúbica:
a) [101] *b*)[0$\bar{1}$0] *c*)[12$\bar{2}$] *d*)[301]
e) [$\bar{2}$01] *f*) [2$\bar{1}$3] *g*) (0$\bar{1}\bar{1}$) *h*) (102)
i) (002) *j*) (1$\bar{3}$0) *k*) ($\bar{2}$12) *l*) (3$\bar{1}\bar{2}$)

3-61 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria cúbica:
a) [1$\bar{1}$0] *b*)[$\bar{2}\bar{2}$1] *c*)[410] *d*)[0$\bar{1}$2]
e) [$\bar{3}$21] *f*) [1$\bar{1}$1] *g*) (11$\bar{1}$) *h*) (01$\bar{1}$)
i) (030) *j*) ($\bar{1}$21) *k*) (11$\bar{3}$) *l*) (0$\bar{4}$1)

3-62 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria hexagonal:
a) [01$\bar{1}$0] *b*) [11$\bar{2}$0] *c*) [$\bar{1}$011]
d) (0003) *e*)($\bar{1}$010) *f*) (01$\bar{1}$1)

3-63 Trace los siguientes planos y direcciones dentro de una celda unitaria hexagonal:
a) [$\bar{2}$110] *b*) [11$\bar{2}$1] *c*) [10$\bar{1}$0]
d) (1$\bar{2}$10) *e*)(11$\bar{2}\bar{2}$) *f*) (12$\bar{3}$0)

3-64 ¿Cuáles son los índices de las seis direcciones de la forma ⟨110⟩ que se encuentran en el plano (11$\bar{1}$) de una celda cúbica?

3-65 ¿Cuáles son los índices de las cuatro direcciones de la forma ⟨111⟩ que se encuentran en el plano ($\bar{1}$01) de una celda cúbica?

3-66 Determine el número de direcciones de la forma ⟨110⟩ en una celda unitaria tetragonal y compárelo con el número de direcciones de la forma ⟨110⟩ de una celda unitaria ortorrómbica.

3-67 Determine el ángulo entre la dirección [110] y el plano (110) de una celda unitaria tetragonal; después, determine el ángulo entre la dirección [011] y el plano (011) en una celda tetragonal. Los parámetros de red son $a_0 = 4.0$ Å y $c_0 = 5.0$ Å. ¿Qué genera la diferencia?

3-68 Determine los índices de Miller del plano que pasa a través de tres puntos que tienen las siguientes coordenadas:
a) (0, 0, 1); (1, 0, 0); y (1/2, 1/2, 0)
b) (1 /2, 0, 1); (1/2, 0, 0); y (0, 1, 0)
c) (1, 0, 0); (0, 1, 1/2); y (1, 1/2, 1/4)
d) (1, 0, 0); (0, 0, 1/4); y (1/2, 1, 0)

3-69 Calcule y compare las densidades lineales de las direcciones ⟨100⟩, ⟨110⟩ y ⟨111⟩ en una celda unitaria centrada en la cara. ¿Cuál es la dirección más compacta (densa)?

3-70 Calcule y compare las densidades lineales de las direcciones ⟨100⟩, ⟨110⟩ y ⟨111⟩ de una celda unitaria centrada en el cuerpo. ¿Cuál es la dirección más compacta (densa)?

3-71 Calcule y compare las densidades planares de las direcciones {100}, {110} y {111} de una celda unitaria centrada en el cuerpo. ¿Cuál es el plano más compacto (denso)?

3-72 Calcule y compare las densidades planares de las direcciones {100}, {110} y {111} de una celda unitaria centrada en la cara. ¿Cuál es el plano más compacto (denso)?

3-73 Determine la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento del níquel CCCa, el cual tiene un parámetro de red de 0.35167 nm, en las direcciones [100], [110] y [111]. ¿Cuál de estas direcciones es compacta?

3-74 Determine la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento del litio CCCu, el cual tiene un parámetro de red de 0.35089 nm, en las direcciones [100], [110] y [111]. ¿Cuál de estas direcciones es compacta?

3-75 Determine la distancia repetitiva, la densidad lineal y la fracción de empaquetamiento del magnesio CH en la dirección [2110] y en la dirección [11$\bar{2}$0]. En el apéndice A se dan los parámetros de red del magnesio CH.

3-76 Determine la densidad y la fracción de empaquetamiento planares del níquel CCCa en los planos (100), (110) y (111). ¿Cuáles de estos planos, si los hay, son compactos?

3-77 Determine la densidad y la fracción de empaquetamiento planares del litio CCCu en los planos (100), (110) y (111). ¿Cuáles de estos planos, si los hay, son compactos?

3-78 Suponga que el rodio CCCa se produce como un hoja de 1 mm de grosor, con el plano (111) paralelo a la superficie de la hoja. ¿De cuántos espaciados interplanares (111) de d_{111} de grosor es la hoja? Vea el apéndice A que contiene la información necesaria.

3-79 En la celda unitaria CCCa, ¿cuántos d_{111} están presentes entre el punto (0, 0, 0) y el punto (1, 1, 1)?

3-80 ¿Cuáles son las secuencias de apilamiento en las estructuras CCCa y CH?

Sección 3-6 Sitios intersticiales

3-81 Determine el radio mínimo de un átomo que quepa en
a) el sitio intersticial tetraédrico del níquel CCCa y en
b) el sitio intersticial octaédrico del litio CCCu.

3-82 ¿Cuáles son los números de coordinación de los sitios octaédricos y tetraédricos?

3-83 La fracción de empaquetamiento atómico de la estructura de cristal CCCa es 0.74. Este es el orden más denso de átomos que se puede alcanzar en tres dimensiones cuando todos los átomos tienen el mismo radio R. Si los átomos del modelo de la esfera dura ocupan 74% del volumen de la celda unitaria, el restante 26% se encuentra vacío. Imagine que los espacios vacíos que se encuentran en el centro de cada arista y en las posiciones centradas en el cuerpo en una celda unitaria CCCa están llenos de esferas pequeñas de radio r de forma tal que $r = 0.414R$. Los átomos pequeños caben perfectamente entre los átomos del radio R.
a) Con base en el conteo usual, ¿cuántos átomos de radio r tiene cada celda unitaria CCCa?
b) ¿Cuáles son las coordenadas de estos átomos de radio r? No se complique contando átomos. Proporcione el mismo número de coordenadas que el número de átomos de radio r por celda unitaria.
c) ¿Cuál es la fracción de empaquetamiento de esta estructura?

Sección 3-7 Estructuras cristalinas de los materiales iónicos

3-84 ¿Cuál es el radio de un átomo que cabe en el sitio octaédrico del cobre CCCa sin alterar la estructura cristalina?

3-85 Utilizando los radios iónicos que se presentan en el apéndice B, determine el número de coordinación esperado de los siguientes compuestos:
a) Y_2O_3 *b*) UO_2 *c*) BaO *d*) Si_3N_4 *e*) GeO_2 *f*) MnO *g*) MgS *h*) KBr

3-86 Una celda unitaria particular es cúbica con iones del tipo A localizados en las esquinas y centrados en las caras de la celda unitaria y iones del tipo B ubicados en el punto medio de cada arista del cubo y en la posición centrada en el cuerpo. Los iones contribuyen de la manera usual a la celda unitaria (una contribución de 1/8 de ion por cada ion en las esquinas, etcétera).
a) ¿Cuántos iones de cada tipo hay en cada celda unitaria?
b) Describa la estructura como una red y una base. Asegúrese de que el número de iones por unidad de celda unitaria dado por su descripción de la estructura como una red y una base es consistente con su respuesta al inciso *a*).
c) ¿Cuál es el número de coordinación de cada ion?
d) ¿Cuál es el nombre que por lo general se da a esta estructura cristalina?

3-87 ¿Se debe esperar que el NiO tenga la estructura del cloruro de cesio, del cloruro de sodio o de la blenda de zinc? Con base en su respuesta, determine
a) el parámetro de red,
b) la densidad y
c) el factor de empaquetamiento.

3-88 ¿Esperaría que el UO_2 tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc o de la fluorita? Con base en su respuesta, determine
a) el parámetro de red,
b) la densidad y
c) el factor de empaquetamiento.

3-89 ¿Se debe esperar que el BeO tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc o de la fluorita? Con base en su respuesta, determine

a) el parámetro de red,
b) la densidad y
c) el factor de empaquetamiento.

3-90 ¿Se debe esperar que el CsBr tenga la estructura del cloruro de sodio, de la blenda de zinc, de la fluorita o del cloruro de cesio? Con base en su respuesta, determine
a) el parámetro de red,
b) la densidad y
c) el factor de empaquetamiento.

3-91 Trace el arreglo de los iones del plano (110) del ZnS (con la estructura de la blenda de zinc) y compare este arreglo con el del plano (110) del CaF_2 (con la estructura de la fluorita). Compare la fracción de empaquetamiento planar de los planos (110) de estos dos materiales.

3-92 El MgO, cuya estructura es la del cloruro de sodio, tiene un parámetro de red de 0.396 nm. Determine la densidad planar y la fracción de empaquetamiento planar de los planos (111) y (222) del MgO. ¿Qué iones están presentes en cada plano?

3-93 Dibuje la estructura cristalina del polimorfo de perovskita del PZT [$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$, x: fracción molar del Zr^{4+}]. Suponga que los dos cationes del sitio B ocupan aleatoriamente posiciones en el sitio B.

Sección 3-8 Estructuras covalentes

3-94 Calcule la densidad teórica del Sn-α. Suponga que el Sn-α tiene la estructura cúbica del diamante; obtenga la información del radio a partir del apéndice B.

3-95 Calcule la densidad teórica del Ge. Suponga que el Ge tiene la estructura cúbica del diamante y obtenga la información del radio atómico a partir del apéndice B.

Sección 3-9 Técnicas de difracción para analizar estructuras cristalinas

3-96 Se observa un haz de rayos x difractados de los planos (220) del hierro a un ángulo 2θ de 99.1° cuando se utilizan rayos x de longitud de onda de 0.15418 nm. Calcule el parámetro de red del hierro.

3-97 Se observa un haz de rayos x difractados de los planos (311) del aluminio a un ángulo 2θ de 78.3° cuando se usan rayos x de longitud de onda de 0.15418 nm. Calcule el parámetro de red del aluminio.

3-98 La figura 3-45 muestra los resultados de un experimento de difracción de rayos x en la forma de la intensidad del pico difractado en función del ángulo de difracción 2θ. Si se utilizaron rayos x con una longitud de onda de 0.15418 nm, determine
a) la estructura cristalina del metal,
b) los índices de los planos que producen cada uno de los picos y
c) el parámetro de red del metal.

3-99 La figura 3-46 muestra los resultados de un experimento de difracción de rayos x de forma de la intensidad del pico difractado en función del ángulo de difracción 2θ. Si se utilizaron rayos x

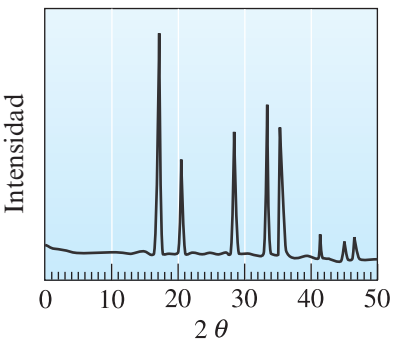


Figura 3-45 Patrón DRX (problema 3-98).

con una longitud de onda de 0.07107 nm, determine
a) la estructura cristalina del metal,
b) los índices de los planos que produce cada uno de los picos y
c) el parámetro de red del metal.

3-100 Una muestra de zirconia contiene polimorfos cúbicos y monoclínicos. Señale una buena técnica analítica para detectar la presencia de estos dos polimorfos distintos.

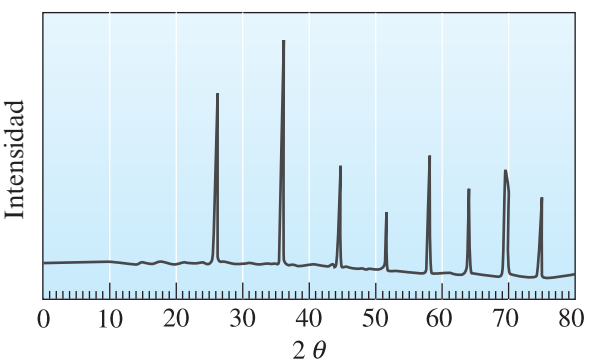


Figura 3-46 Patrón DRX (problema 3-99).

Problemas de diseño

3-101 Se deben clasificar especímenes de hierro, algunos de los cuales son CCCa y otros CCCu. Diseñe un método de difracción de rayos x por medio del cual pueda lograrse este resultado.

3-102 Debe diseñar un material para fabricar utensilios de cocina para cocinar. El material debe ser transparente y soportar el calentamiento y el

enfriamiento repetidos. ¿Qué tipo de materiales podrían utilizarse para diseñar tal artículo de cocina transparente y durable?

Problemas por computadora

3-103 La tabla 3-1 contiene las fórmulas para obtener los volúmenes de distintos tipos de celdas unitarias. Edite un programa de cómputo para calcular el volumen de la celda unitaria de las unidades de $Å^3$ y nm^3. Su programa debe pedirle al usuario que ingrese *a*) el tipo de celda unitaria, *b*) las constantes de red necesarias y *c*) los ángulos. Además, debe reconocer las entradas efectuadas y utilizar la fórmula apropiada para calcular el volumen de la celda unitaria.

3-104 Edite un programa de cómputo que le pida al usuario introducir la masa atómica, el radio atómico y la estructura cristalina cúbica de un elemento. La salida del programa debe ser la fracción de empaquetamiento y la densidad teórica.

Problemas Knovel[MR]

K3-1 Determine los parámetros de red cristalina y las densidades de masa de los semiconductores GaN, GaP, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs e InSb. Compare la información de los parámetros de red de por lo menos dos fuentes distintas.

¿Qué hace rojo al rubí? La adición de alrededor de 1% de óxido de cromo en la alúmina crea defectos. Una transición electrónica entre los niveles de defectos produce el cristal de rubí rojo. De manera similar, la incorporación de Fe^{2+} y Ti^{4+} forma el zafiro azul. (*Lawrence Lawry/PhotoDisc/Getty Images*)

CAPÍTULO

4

Imperfecciones en los arreglos atómicos e iónicos

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Por qué los cristales de silicio que se usan para fabricar obleas de semiconductores contienen pequeñas cantidades de dopantes, como fósforo o boro?*
- *¿Qué hace que el acero sea considerablemente más duro y resistente que el hierro puro?*
- *¿Por qué se usa el cobre de alta pureza como conductor en aplicaciones eléctricas?*
- *¿Por qué los metales CCCa (como el cobre y el aluminio) tienden a ser más dúctiles que los metales CCCu y CH?*
- *¿Cómo pueden reforzarse los metales?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Describir los distintos defectos puntuales que puede contener un material cristalino (vacantes, defectos de sustitución y defecto intersticial).
- Explicar el concepto y la geometría de la dislocación de borde y la dislocación de tornillo y la forma en que las dislocaciones otorgan mayor resistencia a los materiales cristalinos.
- Identificar el sistema de deslizamiento probable de una estructura cristalina determinada.
- Explicar la forma en que los límites de grano otorgan mayor resistencia a los materiales policristalinos.
- Explicar el papel del tamaño del grano en el fortalecimiento de los materiales policristalinos.
- Explicar el proceso de endurecimiento de trabajo y cómo afecta a la resistencia de los materiales cristalinos.

El arreglo de los átomos o iones en los materiales de ingeniería contiene imperfecciones o defectos. Con frecuencia, estos defectos tienen un efecto profundo sobre las propiedades de los materiales. En este capítulo se introducen los tres tipos básicos de imperfecciones: defectos puntuales, defectos lineales (o dislocaciones) y defectos superficiales.

Estas imperfecciones solo representan defectos en o desviaciones de los arreglos atómicos o iónicos perfectos o ideales que se esperan en una estructura cristalina. Al material no se le considera defectuoso desde un punto de vista tecnológico. En muchas aplicaciones, la presencia de tales defectos es en realidad útil. Con frecuencia se pueden crear "defectos" de manera intencional para producir un conjunto deseado de propiedades electrónicas, magnéticas, ópticas o mecánicas. Por ejemplo, el hierro puro es relativamente blando, aunque cuando se le adiciona una pequeña cantidad de carbono, se crean defectos en su arreglo cristalino y el hierro se transforma en un acero al carbono simple que presenta una resistencia considerablemente alta. De manera similar, un cristal de alúmina pura es transparente e incoloro, pero cuando se le adiciona una pequeña cantidad de cromo se crea un defecto especial, que genera un hermoso cristal de rubí rojo. Sin embargo, el efecto de los defectos puntuales no siempre es deseable. Cuando se desea usar el cobre como conductor en microelectrónica, se usa el de mayor pureza disponible. ¡Esto se debe a que incluso niveles pequeños de impurezas provocarán un incremento de órdenes de magnitud en la resistividad eléctrica de ese elemento!

4-1 Defectos puntuales

Los **defectos puntuales** son perturbaciones localizadas en los arreglos iónicos o atómicos de una estructura cristalina que de otra manera sería perfecta. A pesar de que se les llama defectos puntuales, la perturbación afecta una región que involucra varios átomos o iones. Estas imperfecciones, que se muestran en la figura 4-1, pueden ser generadas por el movimiento de los átomos o iones cuando ganan energía al calentarse, durante el procesamiento del material o por la introducción intencional o no intencional de impurezas. Por lo general, las **impurezas** son elementos o compuestos que contienen materias primas o durante el procesamiento. Por ejemplo, los cristales de silicio crecen en crisoles de cuarzo cuya impureza es el oxígeno. Por otro lado, los **dopantes** son elementos o compuestos que se adicionan de manera deliberada, en concentraciones conocidas, en lugares específicos de la microestructura, con un efecto beneficioso deseado sobre las propiedades o el procesamiento. En general, el efecto de las impurezas es perjudicial, mientras que el efecto de los dopantes sobre las propiedades de los materiales es útil. El fósforo y el boro son ejemplos de dopantes que se adicionan a cristales de silicio para mejorar las propiedades eléctricas del silicio puro.

Por lo general, un defecto puntual involucra un átomo o ion, o un par de átomos o iones, y por lo tanto es distinto de los **defectos extendidos**, como las dislocaciones o los límites de grano. Una cuestión importante acerca de los defectos puntuales es que aunque los defectos aparecen en uno o dos sitios, su presencia se "siente" a distancias mucho mayores en el material cristalino.

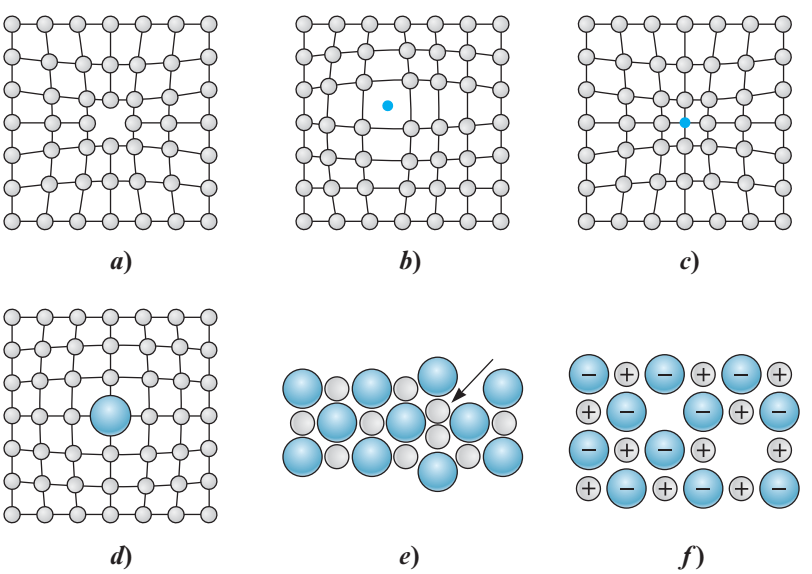


Figura 4-1 Defectos puntuales: *a*) vacancia, *b*) átomo intersticial, *c*) átomo sustitucional pequeño, *d*) átomo sustitucional grande, *e*) defecto de Frenkel y *f*) defecto de Schottky. Todos estos defectos perjudican el arreglo perfecto de los átomos cercanos.

Vacancias

Se produce una **vacancia** cuando un átomo o un ion está ausente de su sitio normal en la estructura cristalina, como en la figura 4-1*a*). Cuando los átomos o iones están ausentes (es decir, cuando se presentan vacancias), aumenta la aleatoriedad o entropía general del material, lo cual incrementa la estabilidad termodinámica de los materiales cristalinos. Todos los materiales cristalinos tienen defectos de vacancia. Éstos se introducen en los metales y aleaciones durante la solidificación, a altas temperaturas, o como consecuencia del daño que produce la radiación. Las vacancias desempeñan una función importante en la determinación de la velocidad a la cual los átomos o iones se mueven alrededor de o se difunden en un material sólido, especialmente en los metales puros. En el capítulo 5 se verá este tema con mayor detalle.

A temperatura ambiente (~298 K), la concentración de vacancias es pequeña, pero aumenta exponencialmente a medida que se incrementa la temperatura, como se muestra por medio del siguiente comportamiento de tipo Arrhenius:

$$n_v = n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right) \tag{4-1}$$

donde

n_v es el número de vacancias por cm^3;

n es el número de átomos por m^3;

Q_v es la energía que se requiere para producir un mol de vacancias, en cal/mol o joules/mol;

R es la constante de los gases, $1.987 \dfrac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ u $\dfrac{8.314 \text{ J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$, y

T es la temperatura en kelvins.

Debido a la gran energía térmica cerca de la temperatura de fusión, puede haber hasta una vacancia por cada 1,000 átomos. Observe que esta ecuación señala la concentración de equilibrio de las vacancias a una temperatura dada. También es posible mantener una concentración de las vacancias que se producen a una alta temperatura si se enfría rápidamente el material. Por lo tanto, en muchas situaciones, la concentración de las vacancias observadas a temperatura ambiente no es la concentración de equilibrio pronosticada por la ecuación 4-1.

Ejemplo 4-1 *Efecto de la temperatura sobre las concentraciones de vacancias*

Calcule la concentración de vacancias en el cobre a temperatura ambiente (25°C). ¿Qué temperatura se necesita para tratar térmicamente el cobre de tal manera que la concentración de las vacancias producidas sea 1,000 veces mayor que la concentración de equilibrio de las vacancias a temperatura ambiente? Suponga que se requieren 83,680 J para producir un mol de vacancias en el cobre.

SOLUCIÓN

El parámetro de red del cobre CCCa es de 0.36151 nm. Hay cuatro átomos en cada celda unitaria; por lo tanto, el número de átomos de cobre por cm^3 es

$$n = \frac{4 \text{ átomos/celda}}{(3.6151 \times 10^{-10} \text{ cm})^3} = 8.466 \times 10^{28} \text{ átomos de cobre/m}^3$$

A temperatura ambiente, $T = 25 + 273 = 298$ K:

$$n_v = n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right)$$

$$= \left(8.466 \times 10^{28} \frac{\text{átomos}}{\text{m}^3}\right) \exp\left[\frac{-83{,}680 \dfrac{\text{cal}}{\text{mol}}}{\left(8.314 \dfrac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(298 \text{ K})}\right]$$

$$= 1.814 \times 10^{14} \text{ vacancias/cm}^3$$

Se desea encontrar una temperatura de tratamiento térmico que genere una concentración de vacancias que sea 1,000 veces mayor que este número, o $n_v = 1.814 \times 10^{17}$ vacancias/m^3.

Se puede resolver este problema por medio del calentamiento del cobre a una temperatura a la cual se forme este número de vacancias:

$$n_v = 1.814 \times 10^{17} = n \exp\left(\frac{-Q_v}{RT}\right)$$

$$= (8.466 \times 10^{28}) \exp\left[-83{,}680/(8.314T)\right]$$

$$\exp\left(\frac{-83{,}680}{8.314T}\right) = \frac{1.814 \times 10^{17}}{8.466 \times 10^{28}} = 2.14 \times 10^{-12}$$

$$\frac{-83{,}680}{8.314T} = \ln(2.14 \times 10^{-12}) = -26.87$$

$$T = \frac{83{,}680}{(8.314)(26.87)} = 375 \text{ K} = 102°\text{C}$$

Cuando el cobre se calienta ligeramente por arriba de 100°C, esperando hasta que se alcance el equilibrio,y después se enfría rápidamente de vuelta a temperatura ambiente, el número de vacancias atrapadas en la estructura puede ser 1,000 veces mayor que el número de equilibrio de vacancias a temperatura ambiente. Por lo tanto, las concentraciones de las vacancias que se encuentran en los materiales con frecuencia son determinadas por factores termodinámicos y cinéticos.

Ejemplo 4-2 *Concentraciones de las vacancias en el hierro*

Calcule la densidad teórica del hierro y después determine el número de las vacancias necesarias para que un cristal de hierro CCCu tenga una densidad de 7,874 kg/m^3. El parámetro de red del hierro es de 2.866×10^{-10} m.

SOLUCIÓN

La densidad teórica esperada del hierro puede calcularse a partir de su parámetro de red y masa atómica. Dado que el hierro es CCCu, están presentes dos átomos de hierro en cada celda unitaria.

$$\rho = \frac{(2 \text{ átomos/celda})(0.055847 \text{ kg/mol})}{(2.866 \times 10^{-10} \text{ m})^3 (6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})} = 7879 \text{ kg/m}^3$$

Este cálculo supone que no hay imperfecciones en el cristal. Se calcula el número de átomos de hierro y vacancias que estarían presentes en cada celda unitaria a una densidad de 7,874 kg/m^3.

$$\rho = \frac{(X \text{ átomos/celda})(0.055847 \text{ kg/mol})}{(2.866 \times 10^{-10} \text{ m})^3 (6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})} = 7879 \text{ kg/m}^3$$

$$X \text{ átomos/celda} = \frac{(7874 \text{ kg/m}^3)(2.866 \times 10^{-10} \text{ m})^3 (6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}{(0.055847 \text{ kg/mol})} = 1.99878$$

Debe haber $2.00 - 1.99878 = 0.00122$ vacancias por celda unitaria. El número de vacancias por m^3 es

$$\text{Vacancias/m}^3 = \frac{0.00122 \text{ vacancias/celda}}{(2.866 \times 10^{-10} \text{ m})^3} = 5.18 \times 10^{25}$$

Observe que otros defectos como los límites de grano de un material policristalino contribuyen a generar una densidad menor que el valor teórico.

Defectos intersticiales

Un **defecto intersticial** se forma cuando se inserta un átomo o ion adicional en la estructura cristalina en una posición por lo general desocupada, como en la figura 4-1*b*). En la tabla 3-6 se ilustraron los sitios intersticiales. Los átomos o iones intersticiales, aunque mucho menores que los átomos o iones localizados en los puntos de red, siguen siendo mayores que los sitios intersticiales que ocupan; en consecuencia, la región cristalina circundante está comprimida y distorsionada. Con frecuencia, los átomos intersticiales, como el hidrógeno, se presentan como impurezas, mientras que los átomos de carbono se adicionan de manera intencional al hierro con el fin de producir acero. En concentraciones pequeñas, los átomos de carbono ocupan sitios intersticiales en la estructura cristalina del hierro, introduciendo un esfuerzo alrededor de la región localizada del cristal. Como se puede observar, la introducción de átomos intersticiales es una manera importante de incrementar la resistencia de los materiales metálicos. A diferencia de las vacancias, una vez introducidos, el número de átomos o iones intersticiales en la estructura permanece casi constante, a pesar de que se modifique la temperatura.

Ejemplo 4-3 *Sitios para el carbono en el hierro*

En el hierro CCCa, los átomos de carbono se localizan en los sitios *octaédricos*, los cuales tienen lugar en el centro de cada arista de la celda unitaria (0, 0, 1/2) y en el centro de dicha celda (1/2, 1/2, 1/2). En el hierro CCCu, los átomos de carbono entran en sitios *tetraédricos*, como (0, 1/2, 1/4). El parámetro de red es de 0.3571 nm en el caso del hierro CCCa y de 0.2866 nm en el del hierro CCCu. Suponga que los átomos de carbono tienen un radio de 0.071 nm. *a*) ¿Se debe esperar una mayor distorsión del cristal por un átomo de carbono intersticial en el hierro CCCa o en el CCCu? *b*) ¿Cuál sería el porcentaje atómico del carbono en cada tipo de hierro si se llenaran todos los sitios intersticiales?

SOLUCIÓN

a) Se puede calcular el tamaño del sitio intersticial en el hierro CCCu en la localización (0, 1/2, 1/4) con la ayuda de la figura 4-2*a*). El radio R_{CCCu} del átomo de hierro es

$$R_{CCCv} = \frac{\sqrt{3}a_0}{4} = \frac{(\sqrt{3})(0.2866\text{ nm})}{4} = 0.1241\text{ nm}$$

A partir de la figura 4-2*a*), se encuentra que:

$$\left(\frac{1}{2}a_0\right)^2 + \left(\frac{1}{4}a_0\right)^2 = (r_{\text{intersticial}} + R_{BCC})^2$$

$$(r_{\text{intersticial}} + R_{CCCv})^2 = 0.3125a_0^2 = (0.3125)(0.2866\text{ nm})^2 = 0.02567\text{ nm}^2$$

$$r_{\text{intersticial}} = \sqrt{0.02567\text{ nm}^2} - 0.1241\text{ nm} = 0.0361\text{ nm}$$

En el caso del hierro CCCa, los sitios intersticiales como el (0, 0, 1/2) se encuentran a lo largo de las direcciones ⟨001⟩. Por lo tanto, el radio del átomo de hierro y el radio del sitio intersticial son [figura 4-2*b*)]:

$$R_{CCCa} = \frac{\sqrt{2}a_0}{4} = \frac{(\sqrt{2})(0.3571\text{ nm})}{4} = 0.1263\text{ nm}$$

$$2r_{\text{intersticial}} + 2R_{CCCa} = a_0$$

$$r_{\text{intersticial}} = \frac{0.3571\text{ nm} - (2)(0.1263)\text{ nm}}{2} = 0.0523\text{ nm}$$

El sitio intersticial en el hierro CCCu es menor que en el hierro CCCa. Dado que ambos son menores que el átomo de carbono, este elemento distorsiona la estructura cristalina CCCu más que CCCa. Como resultado, se espera que entren menos átomos de carbono en las posiciones intersticiales en el hierro CCCu que en las del hierro CCCa.

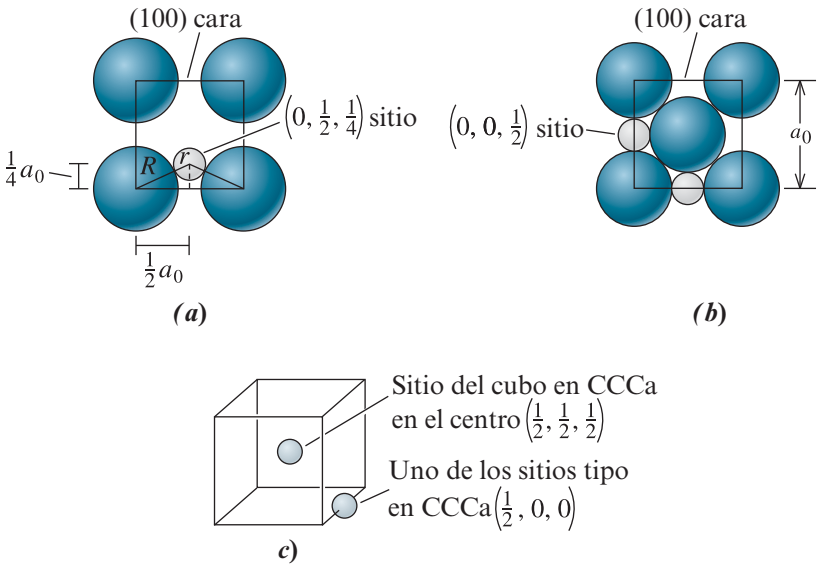


Figura 4-2 *a*) Localización del sitio intersticial $\left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}\right)$ en los metales CCCu. *b*) Sitio $\left(0, 0, \frac{1}{2}\right)$ en los metales CCCa. *c*) Los centros de las aristas y los centros de los cubos son algunos de los sitios intersticiales en la estructura CCCa (ejemplo 4-3).

b) En el hierro CCCu, se esperan dos átomos de hierro en cada celda unitaria. Se puede encontrar un total de 24 sitios intersticiales del tipo (0, 1/2, 1/4); sin embargo, dado que cada sitio se localiza en una cara de la celda unitaria, sólo la mitad de cada sitio pertenece de manera única a una sola celda. Por lo tanto, hay

$$(24 \text{ sitios})\left(\frac{1}{2}\right) = 12 \text{ sitios intersticiales en cada celda unitaria}$$

Si se llenaran todos los sitios intersticiales, el porcentaje atómico del carbono contenido en el hierro sería

$$\text{en \% C} = \frac{12 \text{ átomos de C}}{12 \text{ átomos de C} + 2 \text{ átomos de Fe}} \times 100 = 86\%$$

En el hierro CCCa se esperan cuatro átomos de hierro en cada celda unitaria y el número de sitios intersticiales octaédricos es

$$(12 \text{ aristas})\left(\frac{1}{4}\right) + 1 \text{ centro} = 4 \text{ sitios intersticiales en cada celda unitaria [figura 4-2}c\text{)]}$$

De nuevo, si se llenaran todos los sitios intersticiales octaédricos, el porcentaje atómico del carbono en el hierro CCCa sería

$$\text{en \% C} = \frac{4 \text{ átomos de C}}{4 \text{ átomos de C} + 4 \text{ átomos de Fe}} \times 100 = 50\%$$

Como se verá en un capítulo posterior, el porcentaje atómico máximo del carbono presente en las dos formas del hierro en condiciones de equilibrio es

CCCu: 0.1%
CCCa: 9.1%

Puesto que la deformación impuesta en la estructura cristalina del hierro por los átomos intersticiales, particularmente en el caso del hierro CCCu, la fracción de los sitios intersticiales que pueden ocuparse es bastante pequeña.

Defectos sustitucionales

Se produce un **defecto sustitucional** cuando se reemplaza un átomo o un ion por un tipo distinto de átomo o ion como en la figura 4-1 *c*) y *d*). Los átomos o iones sustitucionales, que ocupan el sitio de red normal, pueden ser mayores que los átomos o iones normales de la estructura cristalina, en cuyo caso se reducen los espaciados interatómicos circundantes, o se agrandan, lo que provoca que los átomos circundantes tengan espaciados interatómicos mayores. En cualquier caso, los defectos sustitucionales alteran al cristal circundante. De nuevo, el defecto sustitucional puede introducirse como una impureza o como una adición de aleación de manera deliberada y, una vez introducidos, el número de defectos es relativamente independiente de la temperatura.

Los ejemplos de defectos sustitucionales incluyen la incorporación de dopantes como el fósforo o el boro en el Si. De manera similar, si se adiciona cobre al níquel, los átomos de cobre ocuparán los sitios cristalográficos donde, por lo general, estarían los átomos de níquel. Con frecuencia, los átomos sustitucionales incrementan la resistencia del material metálico. Los defectos sustitucionales también aparecen en los materiales cerámicos. Por ejemplo, si se adiciona MgO al NiO, los iones Mg^{2+} ocuparán los sitios Ni^{2+} y los iones O^{2-} del MgO los sitios O^{2-} del NiO. Que los átomos o iones entren en los sitios intersticiales o sustitucionales depende del tamaño y la valencia de estos átomos o iones huéspedes en comparación con el tamaño y la valencia de los iones anfitriones. Como se explicó en el capítulo 3, sección 6, el tamaño de los sitios disponibles también desempeña una función en este fenómeno.

4-2 Otros defectos puntuales

Se crea una **intersticialidad** cuando un átomo idéntico a los ubicados en los puntos de red normales se inserta en una posición intersticial. Es más probable encontrar estos defectos en las estructuras cristalinas que tienen un factor de empaquetamiento bajo.

Un **defecto de Frenkel** es un par de vacancia-intersticial formado cuando un ion salta de un punto de red normal a un sitio intersticial, como en la figura 4-1 *e*), y deja atrás una vacancia. Aunque por lo general se asocia con los materiales iónicos, un defecto de Frenkel puede ocurrir en metales y en materiales enlazados de manera covalente. Por su parte, un **defecto de Schottky**, figura 4-1 *f*), es exclusivo de los materiales iónicos y se encuentra de manera común en muchos materiales cerámicos. Cuando las vacancias ocurren en un material enlazado iónicamente, debe estar ausente un número estequiométrico de aniones y cationes en las posiciones atómicas regulares para que se conserve la neutralidad eléctrica. Por ejemplo, una vacancia de Mg^{2+} y una vacancia de O^{2-} en el MgO constituyen un par de Schottky. En la ZrO_2, por una vacancia de Zr^{4+}, habrá dos vacancias de O^{2-}.

Un defecto puntual sustitucional importante ocurre cuando un ion de una carga reemplaza a un ion de una carga diferente. Este podría ser el caso cuando un ion con una valencia de +2 reemplaza un ion con una valencia de +1 (figura 4-3). En este caso se introduce en la estructura una carga positiva adicional. Para mantener el balance de las cargas, podría crearse una vacancia donde por lo regular se localizaría un catión +1. De nuevo, esta imperfección se observa en los materiales que tienen un pronunciado enlace iónico.

Por lo tanto, en los sólidos iónicos, cuando se introducen defectos puntuales, tienen que observarse las siguientes reglas:

a) debe conservarse el balance de la carga de tal manera que el material cristalino como un todo sea eléctricamente neutro;

b) debe conservarse el balance de la masa, y

c) debe conservarse el número de sitios cristalográficos.

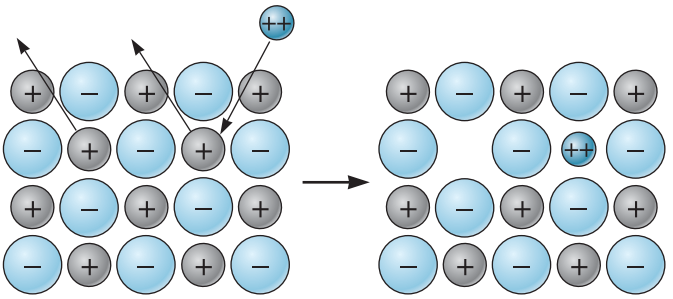


Figura 4-3 Cuando un catión divalente reemplaza un catión monovalente, también debe eliminarse un segundo catión monovalente, lo que crea una vacancia.

Por ejemplo, si en el óxido de níquel (NiO) falta un ion oxígeno, se crea una vacancia de ion oxígeno (designada como $V_O^{\cdot\cdot}$). Cada punto ($\cdot$) en el superíndice indica una carga *efectiva* positiva de uno. Para conservar la estequiometría, el balance de la masa y el balance de la carga, también se debe crear una vacancia de ion níquel (designada como V_{Ni}''). Cada acento ($'$) en el superíndice indica una carga *efectiva* de -1.

Se utiliza la **notación de Kröger-Vink** para escribir las ecuaciones químicas de los defectos. La letra principal de esta notación describe una vacancia o el nombre del elemento. El superíndice indica la carga efectiva del defecto, mientras que el subíndice señala su localización. Un punto ($\cdot$) indica una carga efectiva de $+1$ y un acento ($'$) representa una carga efectiva de -1. En ocasiones se utiliza x para indicar que no hay carga neta. Cualquier electrón libre u orificio se indica como e y h, respectivamente. (En el capítulo 19 se explicarán los orificios.) Las concentraciones de los defectos que están asociados se muestran entre paréntesis. Los defectos asociados, los cuales pueden afectar el transporte de la masa en los materiales, en ocasiones son neutros y difíciles de detectar experimentalmente. Las concentraciones de los defectos se muestran entre corchetes.

Los siguientes ejemplos ilustran el uso de la notación de Kröger-Vink para expresar las **reacciones químicas de los defectos**. En ocasiones, es posible escribir muchas de estas reacciones válidas para describir la posible química del defecto. En tales casos, es necesario tomar en cuenta la energía que se requiere para crear los distintos defectos y se necesita una verificación experimental. Esta notación es útil para describir la química de los defectos en los semiconductores y muchos materiales cerámicos como sensores, dieléctricos y otras aplicaciones.

Ejemplo 4-4 *Aplicación de la notación de Kröger-Vink*

Escriba las reacciones apropiadas de los defectos de *a*) la incorporación de óxido de magnesio (MgO) en óxido de níquel (NiO) y *b*) la formación de un defecto de Schottky en la alúmina (Al_2O_3).

SOLUCIÓN

a) El MgO es el huésped y el NiO el material anfitrión. Se supone que los iones Mg^{2+} deben ocupar los sitios Ni^{2+} y los aniones oxígeno del MgO los sitios O^{2-} del NiO.

$$MgO \xrightarrow{NiO} Mg_{Ni}^{x} + O_O^{x}$$

Se debe asegurar que la ecuación tiene carga, masa y balance de los sitios. En el lado izquierdo hay un Mg, un oxígeno y ninguna carga neta. Lo mismo sucede en el lado derecho. El balance de los sitios puede ser un poco complicado, pues un Mg^{2+} ocupa un sitio Ni^{2+}. Dado que se está introduciendo MgO en NiO, se utiliza un sitio Ni^{2+} y, por lo tanto, se debe utilizar un sitio O^{2-}. Se puede observar que esto es cierto cuando se analiza el lado derecho de esta ecuación.

b) Un defecto de Schottky en la alúmina involucra dos iones aluminio y tres iones oxígeno. Cuando hay una vacancia en un sitio de aluminio, falta una carga de $+3$ y el sitio tiene una carga efectiva de -3. Por lo tanto, V_{Al}''' describe una vacancia del Al^{3+}. De manera similar, $V_O^{\cdot\cdot}$ representa una vacancia del ion oxígeno. Para hacer el balance de los sitios en la alúmina se

necesita asegurar que por cada dos sitios del ion aluminio que se utilizan se usen tres sitios del ion oxígeno. Dado que existen vacancias, la masa del lado derecho es cero y por eso se escribe el lado izquierdo igual a cero. Por ello, la reacción del defecto será

$$\text{cero} \xrightarrow{Al_2O_3} 2V'''_{Al} + 3V''_{O}$$

Ejemplo 4-5 ***Defectos puntuales en la zirconia estabilizada de electrolitos sólidos***

Escriba las reacciones de los defectos de la incorporación de óxido de calcio (CaO) en zirconia (ZrO_2) utilizando la notación de Kröger-Vink.

SOLUCIÓN

Se supone que el Ca^{2+} ocupará sitios Zr^{4+}. Si se envía un Ca^{2+} al Zr^{4+}, el sitio tendrá una carga efectiva de -2 (en vez de tener una carga de $+4$, se tiene una de $+2$). Se ha utilizado un sitio Zr^{4+} y el balance de los sitios requiere *dos sitios del oxígeno*. Se puede enviar un O^{2-} de CaO a uno de los sitios O^{2-} en la ZrO_2. Debe utilizarse otro sitio del oxígeno, pero dado que el balance de las masas también debe conservarse, se tendrá que mantener este sitio vacante (es decir, tendrá que crearse una vacancia de ion oxígeno).

$$CaO \xrightarrow{ZrO_2} Ca''_{Zr} + O_O^x + V_O^{\cdot\cdot}$$

La concentración de las vacancias del oxígeno en la ZrO_2 (es decir, $[V_O^{\cdot\cdot}]$) aumentará con el incremento de la concentración de CaO. Estas vacancias del ion oxígeno estabilizan a la ZrO_2 con un conductor iónico, CaO. Esto permite el uso de este tipo de ZrO_2 en los sensores de oxígeno que se usan en los automóviles y las celdas de combustible de óxido sólido.

4-3 Dislocaciones

Las **dislocaciones** son imperfecciones lineales en un cristal que de otra manera sería perfecto. Por lo general se introducen en el cristal durante la solidificación del material o cuando éste se deforma de manera permanente. Aunque las dislocaciones se encuentran en todos los materiales, entre ellos las cerámicas y los polímeros, *son particularmente útiles para explicar la deformación y el endurecimiento de los materiales metálicos*. Se pueden identificar tres tipos de dislocaciones: la dislocación helicoidal, la dislocación de arista y la dislocación mixta.

Dislocaciones helicoidales

La **dislocación helicoidal** (figura 4-4) puede ilustrarse si se corta parcialmente un cristal perfecto y después se lo tuerce en un espaciado atómico. Si se realiza en un plano cristalográfico una revolución alrededor del eje sobre el cual se torció el cristal, comenzando en el punto *x* y luego se recorren espaciados atómicos iguales en cada dirección en sentido de las manecillas del reloj, se termina en el punto *y* un espaciado atómico debajo del punto inicial. Si no estuviera presente una dislocación helicoidal, la vuelta se cerraría. El vector que se requiere para completar la vuelta es el **vector de Burgers b**. Si se continúa la rotación, se trazaría una trayectoria en espiral. El eje, o línea alrededor de la cual se traza esta trayectoria, es la dislocación helicoidal. El vector de Burgers es paralelo a la dislocación helicoidal.

Dislocaciones de arista

Una **dislocación de arista** (figura 4-5) puede ilustrarse si se corta de manera parcial un cristal perfecto, se separa el cristal y se llena de manera parcial el corte con un medio plano adicional de átomos. La arista inferior de este plano insertado representa la dislocación de arista. Si se describe una vuelta en sentido de las manecillas del reloj alrededor de la dislocación de arista, comenzando en el punto *x* y se recorre un número igual de espaciados atómicos en cada dirección, se termina en el punto *y* a un espaciado atómico del punto inicial. Si no estuviera

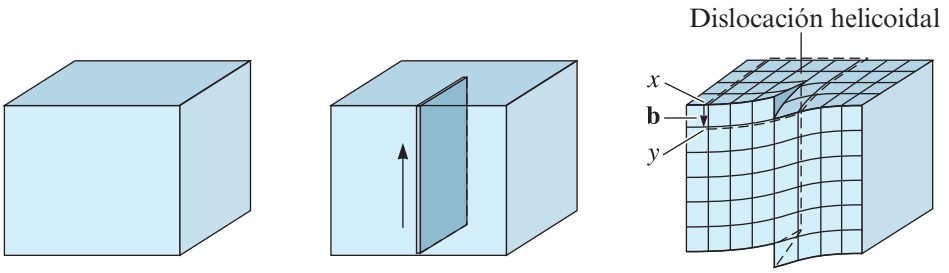


Figura 4-4 El cristal perfecto *a*) se corta y se hace una ranura en un espaciado atómico, *b*) y *c*). La línea a lo largo de la cual ocurre el corte es la dislocación helicoidal. Se requiere un vector de Burgers **b** para completar una vuelta de espaciados atómicos iguales alrededor de la dislocación helicoidal.

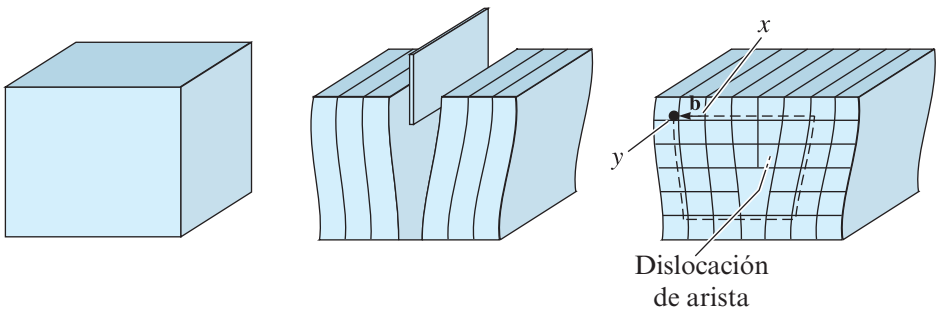


Figura 4-5 El cristal perfecto en *a*) se corta y se inserta un medio plano adicional de átomos *b*). La arista inferior del medio plano adicional es una dislocación de la arista *c*). Se requiere un vector de Burgers **b** para completar una vuelta de espaciados atómicos iguales alrededor de la dislocación de arista. (*Adaptado de* J. D. Verhoeven, Fundamentals of Physical Metallurgy*, Wiley, 1975.*)

presente la dislocación de arista, la vuelta se cerraría. El vector que se requiere para completar la vuelta es, de nuevo, el vector de Burgers, en este caso, perpendicular a la dislocación. Cuando se produce la dislocación, los átomos sobre la línea de ésta se comprimen de manera estrecha, mientras que los átomos debajo de la dislocación se estiran demasiado. La región circundante del cristal es perturbada por la presencia de la dislocación. Con frecuencia se utiliza el símbolo " ⊥ " para indicar una dislocación de arista. El eje largo de los puntos "⊥" apunta hacia el medio plano adicional. A diferencia de una dislocación de arista, una dislocación helicoidal no puede visualizarse como un medio plano adicional de átomos.

Dislocaciones mixtas

Como se muestra en la figura 4-6, las **dislocaciones mixtas** tienen componentes de arista y helicoidal, con una región de transición entre ellas. Sin embargo, el vector de Burgers sigue siendo el mismo para todas las porciones de la dislocación mixta.

Esfuerzos

Cuando se explica el movimiento de las dislocaciones, es necesario referirse al concepto de esfuerzo, el cual se cubrirá con detalle en el capítulo 6. Por ahora, es suficiente decir que el esfuerzo es la fuerza por unidad de área y que se mide en unidades de lb/pulg^2 conocidas como psi (libras por pulgada cuadrada) o N/m^2 conocidas como pascal (Pa). Se origina un esfuerzo normal cuando la fuerza aplicada actúa perpendicular al área de interés. Se origina un esfuerzo cortante τ cuando la fuerza actúa en una dirección paralela al área de interés.

Movimiento de la dislocación

Considere la dislocación de arista que se muestra en la figura 4-7*a*). Al plano que contiene la línea de dislocación y al vector de Burgers se le conoce como **plano del deslizamiento**. Cuando se aplica un esfuerzo cortante lo suficientemente grande que

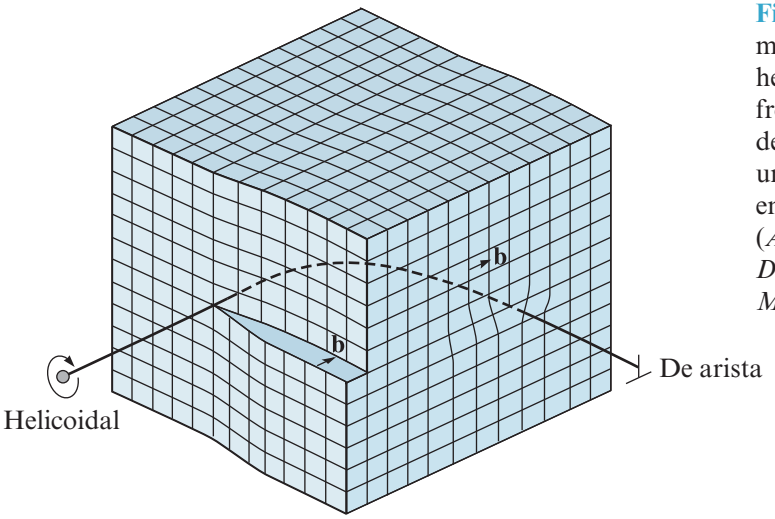


Figura 4-6 Dislocación mixta. La dislocación helicoidal en la cara frontal del cristal cambia de manera gradual a una dislocación de arista en el lado del cristal. (*Adaptada de W. T. Read, Dislocations in Crystals, McGraw-Hill, 1953.*)

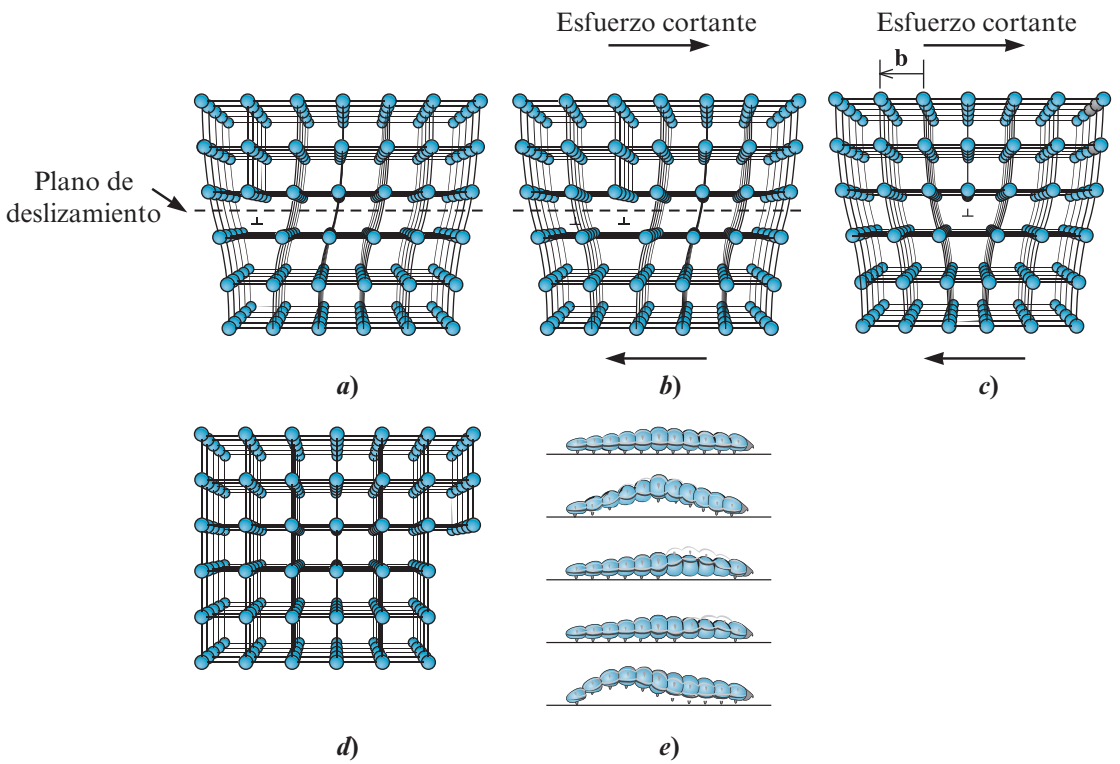


Figura 4-7 *a*) Cuando se aplica un esfuerzo cortante a la dislocación en *a*), los átomos se desplazan, *b*) y ocasionan que la dislocación se mueva un vector de Burgers en la dirección de deslizamiento. *c*) El movimiento continuo de la dislocación con el tiempo crea un escalón *d*) y el cristal se deforma. *e*) El movimiento de la oruga es análogo al movimiento de una dislocación. (*Adaptado de* A. G. Guy, Essentials of Materiales Science, *McGraw-Hill, 1976.*)

opera paralelo al vector de Burgers a un cristal que contiene una dislocación, esta puede moverse a través de un proceso conocido como **deslizamiento**. Los enlaces que atraviesan el plano del deslizamiento entre los átomos de la columna a la derecha de la dislocación aparecen como rotos. Los átomos de la columna a la derecha de la dislocación debajo del plano del deslizamiento se desplazan ligeramente y establecen enlaces con los átomos de la dislocación de arista. De esta manera, la dislocación se ha desplazado a la derecha [figura 4-7*b*)]. Si el proceso continúa, la dislocación se mueve a través del cristal [figura 4-7*c*)] hasta que produce un escalón en el exterior del cristal [figura 4-7*d*)] en **dirección del deslizamiento** (la cual es paralela al vector de Burgers). (Observe que la combinación de un plano de deslizamiento y una dirección del deslizamiento comprende un **sistema de deslizamiento.**)

La mitad superior del cristal ha sido desplazada un vector de Burgers en relación con la mitad inferior; el cristal se ha deformado de manera plástica (o permanente). Éste es el proceso fundamental que ocurre muchas veces a medida que dobla un clip con sus dedos. La deformación plástica de los metales es principalmente el resultado de la propagación de las dislocaciones.

Este proceso progresivo de rompimiento y reformación de enlaces requiere mucho menos energía que la que se necesita para romper de forma instantánea todos los enlaces que atraviesan el plano del deslizamiento. El cristal se deforma por medio de la propagación de las dislocaciones debido a que es un proceso energéticamente favorable. Considere el movimiento por medio del cual se mueve una oruga [figura 4-7*e*)]. Este pequeño insecto sólo levanta algunas de sus patas en algún momento dado y utiliza ese movimiento para moverse de un lugar a otro en lugar de levantar todas las patas a la vez para moverse hacia adelante. ¿Por qué? Debido a que levantar sólo algunas de sus patas requiere menos energía, y es más fácil para la oruga hacer este movimiento. Otra manera de visualizar este desplazamiento es pensar acerca de cómo se puede mover una alfombra grande colocada de manera incorrecta en una habitación. Si desea reposicionar la alfombra, en vez de levantarla del piso y moverla toda a la vez, podría formar un pliegue en la alfombra y empujarlo en la dirección en la que desea moverla. El ancho del pliegue es análogo al vector de Burgers. De nuevo, usted moverá la alfombra de esta manera debido a que se requiere menos energía; es más fácil.

Deslizamiento

La figura 4-8*a*) es un diagrama esquemático de una dislocación de arista sujeta a un esfuerzo cortante τ que actúa en forma paralela al vector de Burgers y de manera perpendicular a la línea de dislocación. En este dibujo, la dislocación de arista se está propagando en la dirección opuesta a la dirección de la propagación que se muestra en la figura 4-7*a*). Una componente del esfuerzo cortante debe actuar en forma paralela al vector de Burgers para que se mueva la dislocación. La línea de dislocación se mueve en una dirección paralela al vector de Burgers. La figura 4-8*b*) muestra una dislocación helicoidal, en cuyo caso una componente del esfuerzo cortante debe actuar en forma paralela al vector de Burgers (y por lo tanto a la línea de dislocación) para que se mueva la dislocación. La dislocación se mueve en una dirección perpendicular al vector de Burgers y el escalón del deslizamiento que se produce es paralelo a éste. Dado que el mencionado vector de una dislocación helicoidal es paralelo a la línea de la dislocación, la especificación del vector de Burgers y la línea de la dislocación no definen el plano del deslizamiento de una dislocación helicoidal.

Durante el deslizamiento, una dislocación se mueve de un conjunto de entornos a un conjunto idéntico de entornos. Se requiere el **esfuerzo de Peierls-Nabarro** (ecuación 4-2) para mover la dislocación de una localización de equilibrio a otra,

$$\tau = c \exp\left(-\frac{kd}{b}\right) \tag{4-2}$$

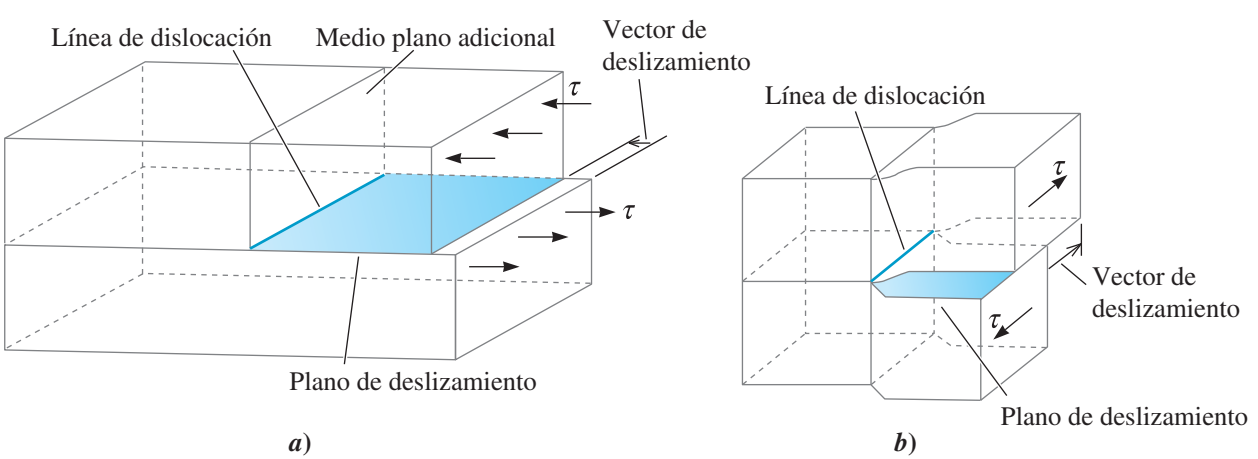


Figura 4-8 Esquema de la línea de dislocación, del plano de deslizamiento y del vector de deslizamiento (Burgers) de *a*) una dislocación de arista y *b*) una dislocación helicoidal. (*Adaptado de* J. D. Verhoeven, Fundamentals of Physical Metallurgy, *Wiley & Sons, 1975.*)

donde τ es el esfuerzo cortante que se requiere para mover la dislocación, d el espaciado interplanar entre los planos de deslizamiento adyacentes, b la magnitud del vector de Burgers, y c y k son constantes del material. La dislocación se mueve en un sistema de deslizamiento que requiere un gasto mínimo de energía. Varios factores importantes determinan los sistemas de deslizamiento más probables de ser activos:

1. El esfuerzo que se requiere para provocar que la dislocación se mueva, aumenta de manera exponencial con la longitud del vector de Burgers. Por lo tanto, la dirección de deslizamiento debe tener una distancia repetitiva pequeña o una densidad lineal alta. Las direcciones compactas en los metales y aleaciones cumplen este criterio y son las direcciones comunes de deslizamiento.
2. El esfuerzo que se requiere para provocar que la dislocación se mueva disminuye de manera exponencial con el espaciado interplanar de los planos de deslizamiento. Éste se lleva a cabo de manera más fácil entre los planos de átomos que son llanos (por lo que hay "colinas o valles" más pequeños sobre la superficie) y entre los planos que están muy alejados (o tienen un espaciado interplanar relativamente grande). Los planos con una densidad planar alta cumplen este requisito. Por lo tanto, los planos de deslizamiento por lo general son planos compactos o lo más compactos posible. En la tabla 4-1 se resumen los sistemas comunes de deslizamiento de varios materiales.
3. Las dislocaciones no se mueven con facilidad en materiales como el silicio, los cuales tienen enlaces covalentes. Debido a la fuerza y direccionalidad de los enlaces, por lo general los materiales fallan de una manera quebradiza antes de que la fuerza sea lo suficientemente poderosa para provocar un deslizamiento apreciable. Las dislocaciones también desempeñan una función relativamente menor en la deformación de los polímeros. La mayoría de éstos contienen una fracción sustancial de volumen de material amorfo y, por lo tanto, no presentan dislocaciones. La deformación permanente de los polímeros involucra sobre todo el estiramiento, la rotación y el desenredado de las moléculas de cadena larga.
4. Los materiales con enlace iónico, entre ellos muchas cerámicas como el MgO, también son resistentes al deslizamiento. El movimiento de una dislocación afecta el balance de la carga alrededor de los aniones y cationes, y provoca que se rompan los enlaces entre los aniones y cationes. Durante el deslizamiento, los iones con carga similar también deben pasar cerca unos de otros, lo que provoca repulsión. Por último, la distancia repetitiva a lo largo de la dirección de deslizamiento, o del vector de Burgers, es mayor que en los metales y aleaciones. De nuevo, la falla quebradiza de los materiales cerámicos ocurre por lo general debido a la presencia de desperfectos, como poros pequeños antes de que el nivel del esfuerzo aplicado sea suficiente para ocasionar que las dislocaciones se muevan. La ductilidad de las cerámicas puede obtenerse por medio de

   a) transformaciones de fase (conocidas como plasticidad de transformación, uno de cuyos ejemplos es la zirconia estabilizada por completo);

Tabla 4-1 Planos y direcciones de deslizamiento en estructuras metálicas

Estructura cristalina	Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento
Metales CCCu	{110} {112} {123}	⟨111⟩
Metales CCCa	{111}	⟨110⟩
Metales CH	(001), (002)* $\{11\bar{2}0\}$ $\{10\bar{1}0\}$ Ver nota $\{10\bar{1}1\}$	[100], [010], [110] ⟨110⟩ o $\langle 10\bar{2}0\rangle$
MgO, NaCl (iónico)	{110}	⟨110⟩
Silicio (covalente)	{111}	⟨110⟩

Nota: Estos planos son activos en algunos metales y aleaciones o a altas temperaturas.
**En la notación de cuatro ejes, los planos y direcciones de desplazamiento son <11$\bar{2}$0> y (0001).*

b) el maclado mecánico;

c) movimiento de la dislocación, y

d) deslizamiento de los límites de granos.

En este capítulo se explicarán algunos de estos conceptos. Por lo general, las temperaturas más altas y los esfuerzos de compresión generan una ductilidad mayor. Recientemente se ha demostrado que ciertas cerámicas, como el titanato de estroncio ($SrTiO_3$), pueden mostrar una ductilidad considerable. En ciertas condiciones, las cerámicas pueden sufrir deformaciones muy grandes, a lo cual se le conoce como comportamiento superplástico.

Ejemplo 4-6 *Cálculo del vector de Burgers*

Calcule la longitud del vector de Burgers del cobre.

SOLUCIÓN

El cobre tiene una estructura cristalina CCCa. Su parámetro de red es de 0.36151 nm. Las direcciones compactas, o las direcciones del vector de Burgers, son de la forma ⟨110⟩. La distancia repetitiva a lo largo de las direcciones ⟨110⟩ es de un medio a la diagonal de la cara, dado que los puntos de red se localizan en las esquinas y en los centros de las caras.

$$\text{Diagonal de la cara} = \sqrt{2}a_0 = (\sqrt{2})(0.36151) = 0.51125 \text{ nm}$$

La longitud del vector de Burgers, o distancia repetitiva, es

$$b = \frac{1}{2}(0.51125) \text{ nm} = 0.25563 \text{ nm}$$

Ejemplo 4-7 *Identificación de planos de deslizamiento preferentes*

La densidad planar del plano (112) del hierro CCCu es 9.94×10^{18} átomos/m^2. Calcule *a*) la densidad planar del plano (110) y *b*) los espaciados interplanares de los planos (112) y (110). Por lo general, ¿en cuál plano ocurrirá un deslizamiento?

SOLUCIÓN

El parámetro de red del hierro CCCu es de 0.2866 nm o 2.866×10^{-10} m. En el caso del plano (110) en la estructura CCCu, un cuarto de los cuatro átomos ubicados en las esquinas más el átomo del centro se encuentran dentro de un área de a_0 veces $\sqrt{2}a_0$.

a) La densidad planar es

$$\text{Densidad planar (110)} = \frac{\text{átomos}}{\text{área}} = \frac{2}{(\sqrt{2})(2.866 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$
$$= 1.72 \times 10^{19} \text{ átomos/m}^2$$

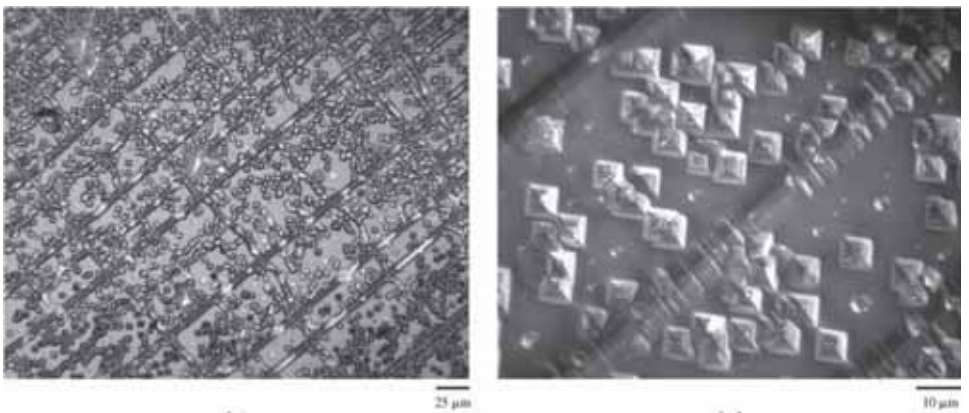
$$\text{Densidad planar (112)} = 0.994 \times 10^{19} \text{ átomos/m}^2 \text{ (del enunciado del problema)}$$

b) Los espaciados interplanares son

$$d_{110} = \frac{2.866 \times 10^{-10}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0}} = 2.027 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_{112} = \frac{2.866 \times 10^{-10}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2}} = 1.170 \times 10^{-10} \text{ m}$$

La densidad planar y el espaciado interplanar del plano (110) son mayores que los del plano (112); por lo tanto, el (110) es el plano de deslizamiento preferente.



a) *b*)

Figura 4-9 Imágenes ópticas de poros de ataque químico en cloruro de sodio (NaCl) deformado y templado por dos horas a 450°C. Los poros de ataque químico corresponden a los puntos de intersección de las dislocaciones con superficie de {001}. Las líneas rectas de las dislocaciones se encuentran en las direcciones ⟨110⟩. *a*) Bajo aumento. *b*) Alto aumento. (*Cortesía del profesor Greg Rohrer de Carnegie Mellon Universiy*)

Cuando se realiza un "ataque químico" sobre un material metálico (un tratamiento por reacción química que involucra la exposición a un ácido o una base), las áreas donde las dislocaciones intersecan la superficie del cristal reaccionan con mayor rapidez que el material circundante. Estas regiones aparecen en la microestructura como **poros de ataque químico**. La figura 4-9 muestra la distribución de los poros de ataque químico sobre una superficie de un cristal de cloruro de sodio.

4-4 Importancia de las dislocaciones

Las dislocaciones son de mayor importancia en los metales y aleaciones, dado que proporcionan un mecanismo para la deformación plástica. La **deformación plástica** implica la deformación o cambio irreversible de la forma en que se lleva a cabo cuando se elimina la fuerza o el esfuerzo que la provocó. La fuerza que se aplica provoca el movimiento de las dislocaciones y el efecto acumulado de los deslizamientos de diversas dislocaciones provoca una deformación plástica. Sin embargo, existen otros mecanismos que ocasionan una deformación permanente. En capítulos posteriores se estudiarán estos temas. Debe distinguirse la deformación plástica de la **deformación elástica**, la cual es un cambio temporal de la forma que ocurre cuando se sigue aplicando una fuerza o un esfuerzo a un material. Cuando la deformación es elástica, el cambio de forma es resultado del estiramiento de los enlaces interatómicos y no se lleva a cabo ningún movimiento de las dislocaciones. El deslizamiento puede ocurrir en algunas cerámicas y polímeros; sin embargo, otros factores (por ejemplo, la porosidad de las cerámicas, el desenredado de las cadenas de los polímeros, etc.) dominan el comportamiento mecánico casi a temperatura ambiente de los polímeros y cerámicas. Los materiales amorfos, como los vidrios de silicato, no poseen un arreglo periódico de iones y por ello no presentan dislocaciones.

Por lo tanto, el proceso del deslizamiento es particularmente importante para comprender el comportamiento mecánico de los metales. Primero, el deslizamiento explica por qué la resistencia de los metales es mucho menor que el valor pronosticado a partir del enlace metálico. Si ocurre el deslizamiento, sólo se necesita romper una pequeña fracción de todos los enlaces metálicos que atraviesan la interfase en cualquier momento y la fuerza que se requiere para deformar el metal es pequeña. Puede demostrarse que la resistencia real de los metales es de 10^3 a 10^4 veces *menor* que la esperada a partir de la fuerza de los enlaces metálicos.

Segundo, el deslizamiento proporciona ductilidad a los metales. Si no se presentaran dislocaciones, una barra de hierro sería quebradiza y el metal no podría moldearse por medio de procesos de metalistería, como la forja, en formas útiles.

Tercero, las propiedades mecánicas de un metal o una aleación se controlan interfiriendo el movimiento de las dislocaciones. La introducción de un obstáculo en el cristal previene que una

dislocación se deslice a menos que se apliquen fuerzas mayores. En consecuencia, la presencia de dislocaciones ayuda a endurecer los materiales metálicos.

En los materiales se encuentran cantidades enormes de dislocaciones. Por lo general, se utiliza la **densidad de las dislocaciones**, o longitud total de dislocaciones por unidad de volumen, para representar la cantidad de dislocaciones presentes. Las densidades de las dislocaciones de 10^6 cm/cm^3 son comunes entre los metales más blandos, mientras que pueden alcanzarse densidades de hasta 10^{12} cm/cm^3 para deformar el material.

Las dislocaciones también influyen en las propiedades electrónicas y ópticas de los materiales. Por ejemplo, la resistencia del cobre puro aumenta a la par del incremento de la densidad de las dislocaciones. Páginas atrás se mencionó que la resistividad del cobre puro también depende, en gran medida, de pequeños niveles de impurezas. De manera similar, se prefiere el uso de cristales de silicio que sean en esencia libres de dislocaciones dado que la ausencia de éstas permite que los portadores de carga, como los electrones, se muevan de manera más libre a lo largo del sólido. Por lo general, la presencia de dislocaciones tiene un efecto perjudicial en el desempeño de los fotodetectores, diodos emisores de luz, láseres y celdas solares. Con frecuencia, estos dispositivos se fabrican a partir de semiconductores compuestos como el arseniuro de galio-arseniuro de aluminio (GaAs-AlAs), cuyas dislocaciones pueden originarse como producto de las desigualdades entre las concentraciones en el fundido a partir del cual crecen los cristales o a que se inducen esfuerzos, debido a los gradientes térmicos a los que se exponen estos materiales durante el enfriamiento de la temperatura de crecimiento.

4-5 Ley de Schmid

Se pueden comprender las diferencias entre los comportamientos de los metales que tienen estructuras cristalinas distintas si se examina la fuerza que se requiere para iniciar el proceso del deslizamiento. Suponga que se aplica una fuerza unidireccional F a un cilindro de metal monocristalino (figura 4-10). Se puede orientar el plano y la dirección de deslizamiento a la fuerza aplicada mediante la definición de los ángulos λ y ϕ. El ángulo entre la dirección de deslizamiento y la fuerza aplicada es λ mientras que ϕ es el ángulo entre la normal al plano de deslizamiento y la fuerza aplicada. Observe que la suma de los ángulos ϕ y λ puede, pero no necesariamente debe, ser de 90°.

Para que la dislocación se mueva en su sistema de deslizamiento, debe producirse por medio de la fuerza aplicada de una fuerza de corte que actúe en la dirección del deslizamiento. Esta fuerza de corte resuelta F_r está dada por

$$F_r = F\cos\lambda$$

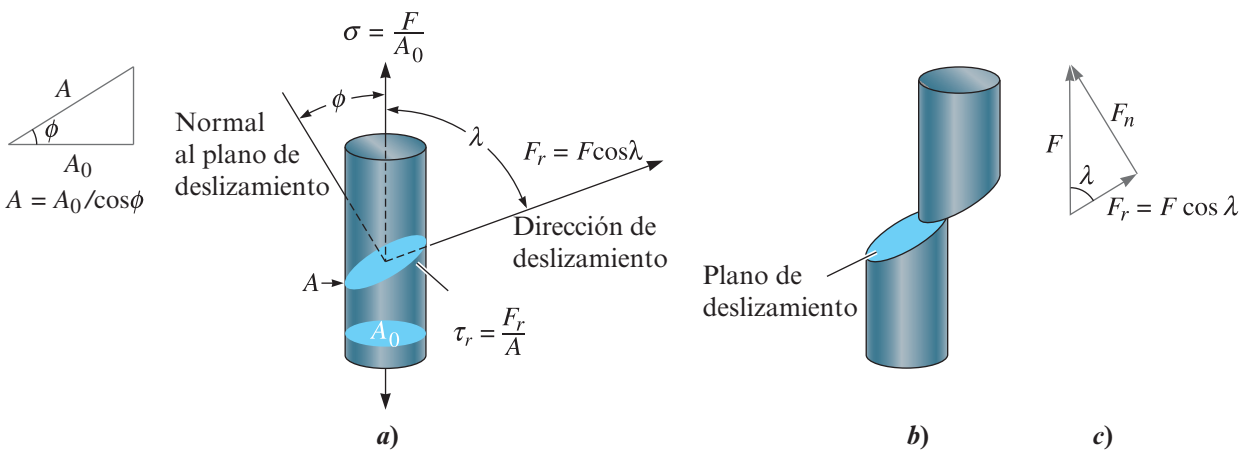


Figura 4-10 *a*) Se produce un esfuerzo cortante τ resuelto en el sistema de deslizamiento. [Nota: (ϕ+λ) no tiene que ser igual a 90°.] *b*) El movimiento de las dislocaciones en el sistema de deslizamiento deforma el material. *c*) Resolución de la fuerza.

Si se divide la ecuación entre el área del plano de deslizamiento, $A = A_0/\cos\phi$, se obtiene la siguiente ecuación, conocida como **ley de Schmid:**

$$\tau_r = \sigma \cos\phi \cos\lambda \tag{4-3}$$

donde

$$\tau_r = \frac{F_r}{A} = \text{esfuerzo cortante resuelto en la dirección de deslizamiento}$$

y

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \text{esfuerzo normal aplicado al cilindro}$$

Ejemplo 4-8 *Cálculo del esfuerzo cortante resuelto*

Aplique la ley de Schmid en una situación en la que el monocristal está orientado de tal manera que el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo de tensión aplicado.

SOLUCIÓN

Suponga que el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo aplicado σ, como en la figura 4-11. Entonces, $\phi = 0$, $\lambda = 90°$, $\cos\lambda = 0$, y por lo tanto $\tau_r = 0$. Como se observó antes, los ángulos ϕ y λ pueden, pero no siempre, sumar 90°. Aun si el esfuerzo aplicado σ es enorme, no se desarrolla ningún esfuerzo cortante a lo largo de la dirección de deslizamiento y la dislocación no puede moverse. (Podría desarrollar un experimento sencillo para demostrar esto con un mazo de cartas. Si presiona el mazo en un ángulo, las cartas se deslizarán una sobre otra, como en el proceso del deslizamiento. Sin embargo, si presiona de manera perpendicular al mazo, las cartas no se deslizarán.) No puede ocurrir deslizamiento si el sistema de deslizamiento está orientado de tal manera que λ o ϕ sea de 90°.

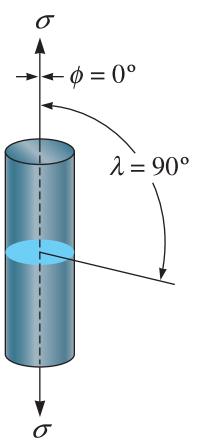


Figura 4-11 Cuando el plano de deslizamiento es perpendicular al esfuerzo aplicado σ, el ángulo λ es de 90° y no se resuelve ningún esfuerzo cortante.

El **esfuerzo cortante resuelto crítico** τ_{ecrc} es el esfuerzo cortante que se requiere para que ocurra el deslizamiento. Por lo tanto, el deslizamiento ocurre y ocasiona que el material se deforme de manera plástica, cuando el esfuerzo *aplicado* (σ) produce un esfuerzo cortante *resuelto* (τ_r) que es igual al esfuerzo cortante resuelto crítico:

$$\tau_r = \tau_{ecrc} \tag{4-4}$$

Ejemplo 4-9 *Diseño de un proceso de colado de un monocristal*

Se desea producir una barra compuesta de un monocristal de aluminio puro, el cual tiene un esfuerzo cortante resuelto crítico de 148 psi. Se desea orientar la barra de tal manera que, cuando se aplique un esfuerzo axial de 500 psi, la barra se deforme por el deslizamiento en una dirección de 45° respecto de su eje y accione un sensor que detecte la sobrecarga. Diseñe la barra.

SOLUCIÓN

Las dislocaciones comienzan a moverse cuando el esfuerzo cortante resuelto τ_r es igual al esfuerzo cortante resuelto crítico, en este caso, de 1,020 kPa. A partir de la ley de Schmid:

$$\tau_r = \sigma \cos\lambda \cos\phi$$
$$1{,}020\text{kPa} = (3{,}447.4\text{ kPa}) \cos\lambda \cos\phi$$

Puesto a que se desea que el deslizamiento ocurra a un ángulo de 45° respecto del eje de la barra, $\lambda = 45°$ y

$$\cos\phi = \frac{1020}{3447.4 \cos 45°} = 0.4186$$
$$\phi = 65.3°$$

Por lo tanto, se debe producir una barra que se oriente de tal manera que $\lambda = 45°$ y $\phi = 65.3°$. Observe que ϕ y λ no suman 90°.

Se podría realizar este cálculo por medio de un proceso de solidificación. Podría orientarse un cristal semilla de aluminio sólido en la parte inferior de un molde. El aluminio líquido podría introducirse en el molde. El líquido se solidifica en el cristal semilla y se produce una barra de monocristal con la orientación apropiada.

4-6 Influencia de la estructura cristalina

Se puede utilizar la ley de Schmid para comparar las propiedades de los metales que tienen estructuras cristalinas CCCu, CCCa y CH. La tabla 4-2 presenta tres factores importantes que se pueden examinar. Sin embargo, debe ser cuidadoso, pues esta explicación describe el comportamiento de monocristales casi perfectos. Los materiales de ingeniería reales rara vez son monocristales y siempre contienen gran cantidad de defectos. También tienden a ser policristalinos. Dado que distintos cristales o granos están orientados en diferentes direcciones aleatorias, no se puede aplicar la ley de Schmid para predecir el comportamiento mecánico de los materiales policristalinos.

Esfuerzo cortante resuelto crítico Si el esfuerzo cortante resuelto crítico en un metal es muy alto, el esfuerzo aplicado σ también debe ser alto para que τ_r sea igual a τ_{ecrc}. Un τ_{ecrc} más alto implica que se necesita un esfuerzo mayor para deformar un metal de manera plástica, ¡lo cual a su vez indica que el metal tiene una resistencia alta! En los metales CCCa, los cuales tienen planos compactos {111}, el esfuerzo cortante resuelto crítico es bajo, alrededor de 50 a 100 psi en el caso de un cristal casi perfecto. Por otro lado, las estructuras cristalinas CCCu contienen planos no compactos y se debe exceder un esfuerzo cortante resuelto crítico mayor, en el orden de 10,000 psi en

Tabla 4-2 Resumen de los factores que afectan el deslizamiento en las estructuras metálicas

Factor	CCCa	CCCu	CH $\left(\frac{c}{a} \geq 1.633\right)$
Esfuerzo cortante resuelto crítico (kPa)	345–690	34,500–69,000	345–690[a]
Número de sistemas de deslizamiento	12	48	3[b]
Deslizamiento cruzado	Puede ocurrir	Puede ocurrir	No puede ocurrir[b]
Resumen de las propiedades	Dúctil	Resistente	Relativamente quebradizo

[a] *Para el deslizamiento en los planos basales.*
[b] *Cuando se fabrican aleaciones o se los calienta a altas temperaturas en los metales CH se activan sistemas de deslizamiento adicionales, lo que permite que ocurra un deslizamiento cruzado y por lo tanto mejore la ductilidad.*

los cristales casi perfectos, antes de que ocurra el deslizamiento; por ello, los metales CCCu tienden a tener resistencias altas y ductilidades más bajas en comparación con los metales CCCa.

Se debe esperar que los metales CH, debido a que contienen planos basales compactos, tengan esfuerzos cortantes resueltos críticos bajos. En realidad, en los metales CH como el zinc, que tiene una razón *c*/*a* mayor que o igual a la razón teórica de 1.633, la tensión cortante resuelta crítica es menor de 100 psi, como en los metales CCCa. Sin embargo, en el titanio CH, la razón *c*/*a* es menor a 1.633, y los planos compactos están espaciados de manera muy estrecha. El deslizamiento ocurre ahora en los planos o caras del "prisma" del hexágono, y el esfuerzo cortante resuelto crítico es entonces tan grande que o mayor que en los metales CCCu.

Número de sistemas de deslizamiento

Si por lo menos un sistema de deslizamiento está orientado para formar ángulos λ y ϕ cercanos a 45°, entonces τ_r es igual a τ_{ecrc} cuando los esfuerzos aplicados son pequeños. Los metales CH ideales sólo poseen un conjunto de planos compactos paralelos, los planos (001), que son paralelos a los planos (002) [en conjunto se conocen como planos (0001) en la notación de cuatro ejes]. Un conjunto de planos compactos con tres direcciones compactas comprende tres sistemas de deslizamiento. En consecuencia, la probabilidad de que los planos y las direcciones compactos estén orientados con λ y ϕ cercanos a 45° es muy baja. El cristal CH puede fallar de manera quebradiza sin un deslizamiento significativo; sin embargo, en los metales CH con una razón *c*/*a* baja, o cuando los metales CH están aleados de manera apropiada, o cuando se incrementa la temperatura, se activan otros sistemas de deslizamiento, lo que provoca que estos metales sean menos quebradizos de lo esperado.

Por otro lado, los metales CCCa contienen cuatro planos compactos no paralelos de la forma {111} y tres direcciones compactas de la forma <110> dentro de cada plano, lo que da un total de 12 sistemas de deslizamiento. Por lo menos uno de ellos está orientado de manera favorable para que se lleve a cabo el deslizamiento cuando los esfuerzos que se aplican son pequeños, lo que permite que los metales CCCa tengan ductilidades altas.

Por último, los metales CCCu tienen hasta 48 sistemas de deslizamiento estrechamente compactados. Varios de ellos siempre están orientados de manera apropiada para que ocurra el deslizamiento, lo que permite que los metales CCCu también sean dúctiles.

Deslizamiento cruzado

Considere una dislocación helicoidal que se mueve en un plano de deslizamiento que encuentra un obstáculo que le impide seguir en movimiento. Esta dislocación puede desplazarse a un segundo sistema de deslizamiento intersecante, también orientado de manera apropiada, y continuar moviéndose. A este fenómeno se le llama **deslizamiento cruzado**. En muchos metales CH este deslizamiento no puede ocurrir debido a que los planos de deslizamiento son paralelos (es decir, no intersecantes). Por lo tanto, los metales CH policristalinos tienden a ser quebradizos.

Por fortuna, se activan sistemas de deslizamiento adicionales cuando los metales CH conforman aleaciones o se calientan, lo que mejora la ductilidad. El deslizamiento cruzado es posible en los metales CCCa y CCCu, debido a que están presentes varios sistemas de deslizamiento intersecantes. En consecuencia, el deslizamiento cruzado ayuda a mantener la ductilidad de estos metales.

Ejemplo 4-10 *Ductilidad de los materiales monocristalinos y policristalinos metálicos CH*

Un monocristal de magnesio, que tiene la estructura cristalina CH, puede estirarse de manera parecida a una cinta de cuatro a seis veces su longitud original; sin embargo, el Mg *policristalino* y otros metales con la estructura CH tienen ductilidades limitadas. Utilice los valores del esfuerzo cortante resuelto crítico de los metales con distintas estructuras cristalinas y la naturaleza de la deformación de los materiales policristalinos para explicar esta observación.

SOLUCIÓN

A partir de la tabla 4-2 se observa que, en el caso de los metales CH como el Mg, el esfuerzo cortante resuelto crítico es bajo (de 50-100 psi). También se observa que el deslizamiento de los

metales CH ocurrirá con facilidad en el plano basal, el plano de deslizamiento principal. Cuando se deforma un monocristal, suponiendo que el plano basal está orientado de manera adecuada con respecto al esfuerzo aplicado, puede ocurrir una deformación grande. Esto explica por qué el Mg monocristalino puede estirarse en una cinta de cuatro a seis veces su longitud original. Cuando el Mg es policristalino, la deformación no es tan sencilla. Cada cristal debe deformarse, de tal manera que el esfuerzo desarrollado en cualquier cristal sea acomodado por sus vecinos.

Los metales CH carecen de sistemas de deslizamiento intersecantes; por lo tanto, las dislocaciones no pueden deslizarse de un plano de deslizamiento en un cristal (grano) a otro plano de deslizamiento en un cristal vecino. Como resultado de ello, los metales CH policristalinos, como el Mg, muestran ductilidad limitada.

4-7 Defectos superficiales

Los **defectos superficiales** son los límites, o planos, que separan un material en regiones. Por ejemplo, cada región puede tener la misma estructura cristalina, pero orientaciones distintas.

Superficie del material

Las dimensiones exteriores del material representan las superficies en las que el cristal termina de manera abrupta. Cada átomo ubicado en la superficie ya no posee el número de coordinación apropiado y se interrumpe el enlazamiento atómico. La superficie exterior también puede ser muy áspera, contener muescas diminutas y ser mucho más reactiva que la mayor parte del material.

En los materiales nanoestructurados, la razón del número de átomos o iones en la superficie a la del volumen es muy alta. Como resultado, estos materiales tienen un área de superficie por unidad de masa grande. De manera similar a los materiales a nanoescala, la razón área de superficie a volumen es alta en el caso de los materiales porosos, geles y polvos ultrafinos. En el refinamiento del petróleo y muchas otras áreas de la tecnología se usan catalizadores de área de superficie alta para mejorar la cinética de las reacciones químicas. La reducción del área de superficie es la fuerza conductora termodinámica para **sinterizar** las cerámicas y los polvos metálicos.

Límites de grano

La microestructura de muchas cerámicas de ingeniería y materiales metálicos consiste en muchos granos. Un **grano** es una porción del material dentro de la cual el arreglo de los átomos es casi idéntico; sin embargo, la orientación del arreglo de átomos, o estructura cristalina, es distinta en cada grano vecino. En la figura 4-12*a*) se muestran tres granos; el arreglo de los átomos en cada uno de ellos es idéntico, pero los granos están orientados de manera distinta. Un **límite de grano**, la superficie que separa los granos individuales, es una zona angosta en la que los átomos no están espaciados de manera apropiada. En otras palabras, los átomos están tan cercanos entre sí en algunas localizaciones en los límites de los granos que generan una región de compresión, mientras que en otras áreas están tan alejados que generan una región de tensión. La figura 4-12*b*) muestra una micrografía de los granos en una muestra de acero inoxidable. La figura 4-12*c*) es una micrografía electrónica de alta resolución de la transmisión de barrido de un límite de grano de oro. Esta figura demuestra que la ilustración de la figura 4-12*a*) exagera en gran medida la separación entre los átomos de los límites de grano.

Un método para controlar las propiedades de un material es por medio del control del tamaño del grano. Si se reduce el tamaño del grano, se incrementa el número de granos y, por lo tanto, aumenta la cantidad del área de los límites de grano. Cualquier dislocación sólo se mueve una distancia corta antes de que se encuentre con un límite de grano y se incremente la resistencia del material metálico. La **ecuación de Hall-Petch** relaciona el tamaño del grano con el **límite elástico**,

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \tag{4-5}$$

donde σ_y es el límite elástico (el nivel de esfuerzo necesario para provocar una cierta cantidad de deformación permanente), d el diámetro promedio de los granos, y σ_0 y K son constantes del metal. Recuerde del capítulo 1 que el límite elástico de un material metálico es el nivel mínimo de esfuerzo

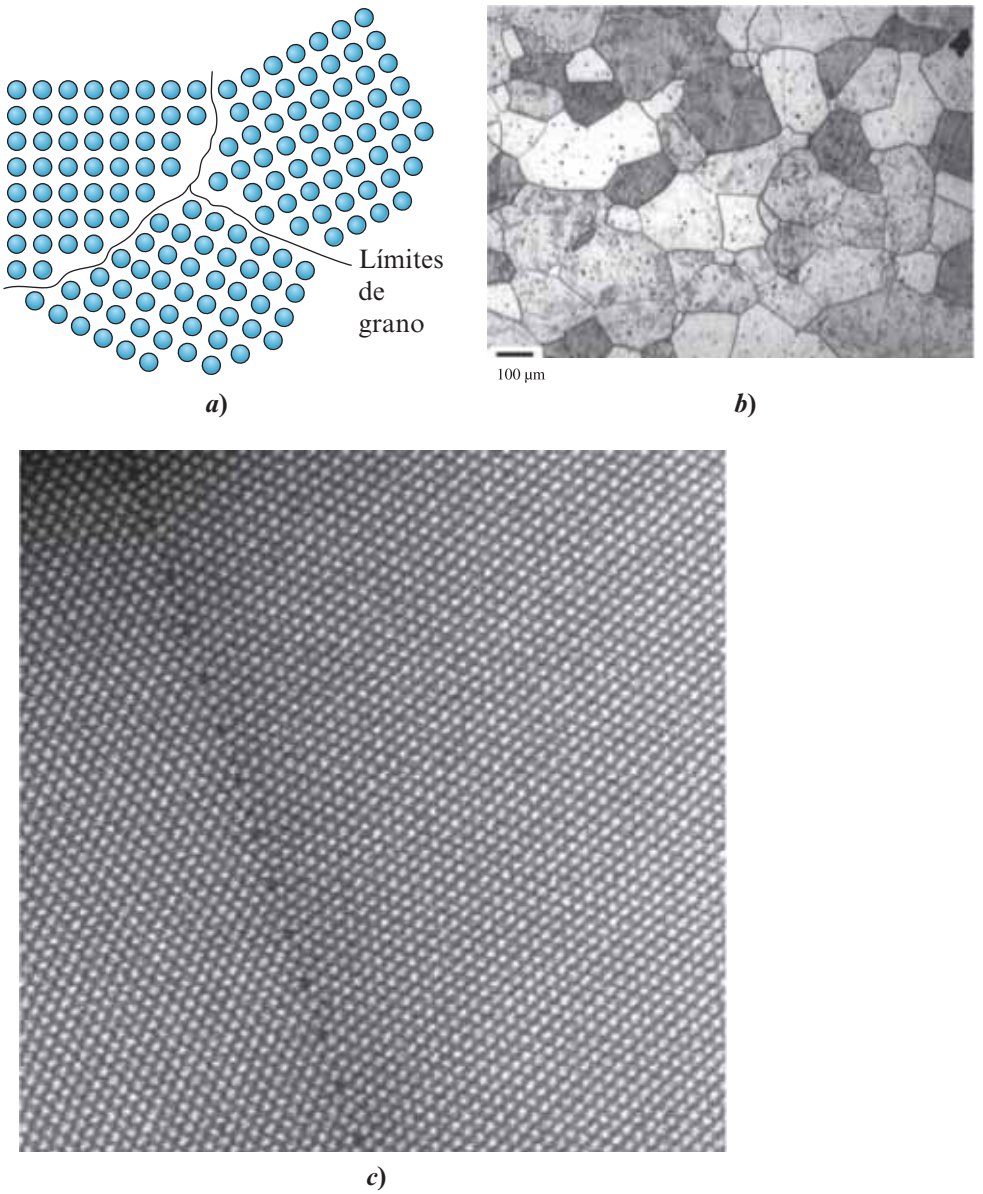


Figura 4-12 *a*) Los átomos cercanos a los límites de los tres granos no tienen un espaciado o arreglo de equilibrio como muestra este esquema. *b*) Granos y límites de grano de una muestra de acero inoxidable. (*Micrografía cortesía de los doctores A. J. Deardo, M. Hua y J. García*). *c*) Micrografía electrónica de alta resolución de la transmisión de barrido en un límite de grano de oro. (*Imagen tomada con el FEI Titan STEM 80-300, cortesía de FEI.*)

que se necesita para iniciar la deformación plástica (permanente). La figura 4-13 muestra esta relación en el caso del acero. La ecuación de Hall-Petch no es válida para los materiales con granos inusualmente grandes o ultrafinos. En los capítulos siguientes se describirá la forma en que el tamaño de grano de los metales y las aleaciones puede controlarse a través de la solidificación, la aleación y el tratamiento térmico.

La *microscopía óptica* es una técnica que se utiliza para revelar características microestructurales, por ejemplo, los límites de grano que requieren menos de alrededor de 2000 aumentos. Al proceso de la preparación de una muestra metálica y la observación o registro de su microestructura se le llama **metalografía**. Una muestra del material se lija y se pule hasta un acabado similar a un espejo. La superficie se expone a un ataque químico, o grabado a agua fuerte, en el que los límites de

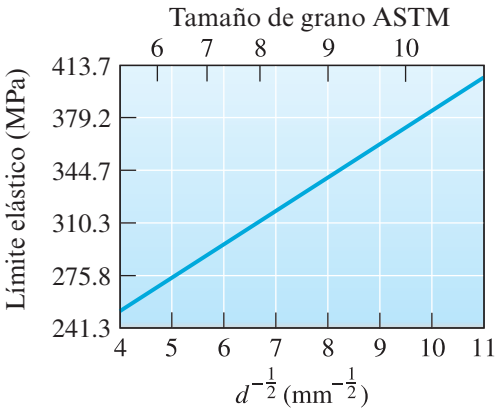


Figura 4-13 Efecto del tamaño del grano sobre el límite elástico del acero a temperatura ambiente.

Ejemplo 4-11 *Diseño de un acero dulce*

El límite elástico del acero dulce con un tamaño de grano promedio de 0.05 mm es de 137.9 MPa. El límite elástico del mismo acero con un tamaño de grano de 0.007 mm es de 275.8 MPa. ¿Cuál será el tamaño promedio de grano del mismo acero con una fluencia de 206.9 MPa? Suponga que la ecuación de Hall-Petch es válida y que los cambios en el esfuerzo de cedencia observado se deben a los cambios en el tamaño del grano.

SOLUCIÓN

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

Utilizando la ecuación de Hall-Petch

$$137.9 = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{0.05}}$$

En el caso de un tamaño de grano de 0.007 mm, el esfuerzo de cadencia es de 275.8 MPa. Por lo tanto, utilizando de nuevo la ecuación de Hall-Petch

$$275.8 = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{0.007}}$$

La solución de estas dos ecuaciones es $K = 18.44$ MPa · mm$^{1/2}$, y $\sigma_0 = 55.5$ MPa. Ahora se tiene la ecuación de Hall-Petch como

$$\sigma_y = 55.5 + 18.44\, d^{-1/2}$$

Si se desea un esfuerzo de cedencia de 30,000 psi o 206.9 MPa, el tamaño de grano debe ser de 0.0148 mm.

grano son atacados de manera más agresiva que el resto del grano. La luz de un microscopio óptico es reflejada por o dispersada de la superficie de la muestra, lo cual depende de cómo se grabó a agua fuerte la superficie. Cuando se dispersa más luz de las características grabadas de manera profunda como los límites de los granos, estas características aparecen oscuras (figura 4-14). Con frecuencia, en las muestras cerámicas se utiliza una técnica conocida como **ranurado térmico** para observar los límites de grano. Este recurso involucra pulir y calentar una muestra cerámica a temperaturas inferiores a las de sinterización (1,300°C) por un corto periodo. La sinterización es un proceso que se utiliza para formar una masa densa por medio del calentamiento del material en polvo compactado.

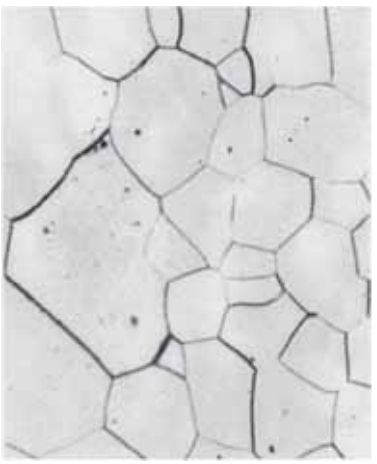


Figura 4-14 Microestructura del paladio (100 ×). [*De* ASM Handbook, *Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

Una forma de especificar el tamaño del grano es utilizando el número de **tamaño de grano ASTM** (ASTM es la American Society for Testing and Materials). El número de granos por pulgada cuadrada se determina a partir de una fotografía del metal tomada a una magnificación de 100. El número de tamaño de grano ASTM n se calcula como

$$N = 2^{n-1} \tag{4-6}$$

donde N es el número de granos por pulgada cuadrada.

Un número ASTM grande indica muchos granos, o un tamaño de grano fino, y se correlaciona con las altas resistencias de los metales.

Cuando se describe una microestructura, siempre que es posible es preferible utilizar un marcador micrométrico o alguna otra escala del micrógrafo, en lugar de enunciar la magnificación como ×, como en la figura 4-14. De esta manera, si la micrografía se agranda o se reduce, las escalas del marcador micrométrico lo hacen con él y no se tiene que preocupar acerca de los cambios en la magnificación de la micrografía original. Existen varios sofisticados programas de **análisis de imágenes**. Cuando se utilizan tales programas, no sólo es posible obtener información sobre el número ASTM de tamaño de grano, sino también información cuantitativa sobre el tamaño de grano promedio, la distribución del tamaño de los granos, la porosidad, las segundas fases (capítulo 11), etc. Se pueden adquirir varios microscopios electrónicos ópticos y de barrido con capacidades de análisis de imagen. El siguiente ejemplo ilustra el cálculo del número ASTM de tamaño de grano.

Ejemplo 4-12 *Cálculo del número ASTM de tamaño del grano*

Suponga que se cuentan (2.48×10^4 granos/m^2) en una fotomicrografía tomada a una ampliación de 250. ¿Cuál es el número ASTM de tamaño del grano?

SOLUCIÓN

Considere una pulgada cuadrada de la fotomicrografía tomada con una ampliación de 250. A una ampliación de 100, la región de una pulgada cuadrada de la ampliación de la imagen de 250 aparecería como

$$1 \text{ m}^2 \left(\frac{100}{250}\right)^2 = 0.16 \text{ m}^2$$

y se observarían

$$\frac{2048 \times 10^4}{0.16 \text{ pulg}^2} = 1.55 \times 10^5 \text{ granos/m}^2$$

Al sustituir en la ecuación 4-6,

$$N = 1.55 \times 10^5 \text{ granos/m}^2 = 2^{n-1}$$

$$\log 1 = (n - 1)\log 2$$

$$2 = (n - 1)(0.301)$$

$$N = 7.64$$

Límites de grano de ángulo pequeño

Un **límite de grano de ángulo pequeño** es un arreglo de las dislocaciones que produce una desorientación pequeña entre los cristales adyacentes (figura 4-15). Debido que la energía de la superficie es menor que la de un límite de grano regular, los límites de granos de ángulo pequeño no son tan eficaces para bloquear deslizamientos. A los límites de ángulo pequeño formados por dislocaciones de arista se les llama **límites inclinados,** y a los ocasionados por dislocaciones se les llama **límites de giro**.

Fallas de apilamiento

Las **fallas de apilamiento**, las cuales ocurren en metales CCCa, representan un error en la secuencia de apilamiento de los planos compactos. Por lo general, se produce una secuencia de apilamiento *ABC ABC ABC* en un cristal CCCa perfecto. Suponga que en su lugar se produce la siguiente secuencia:

$$ABC\ \underline{ABAB}\ CABC$$

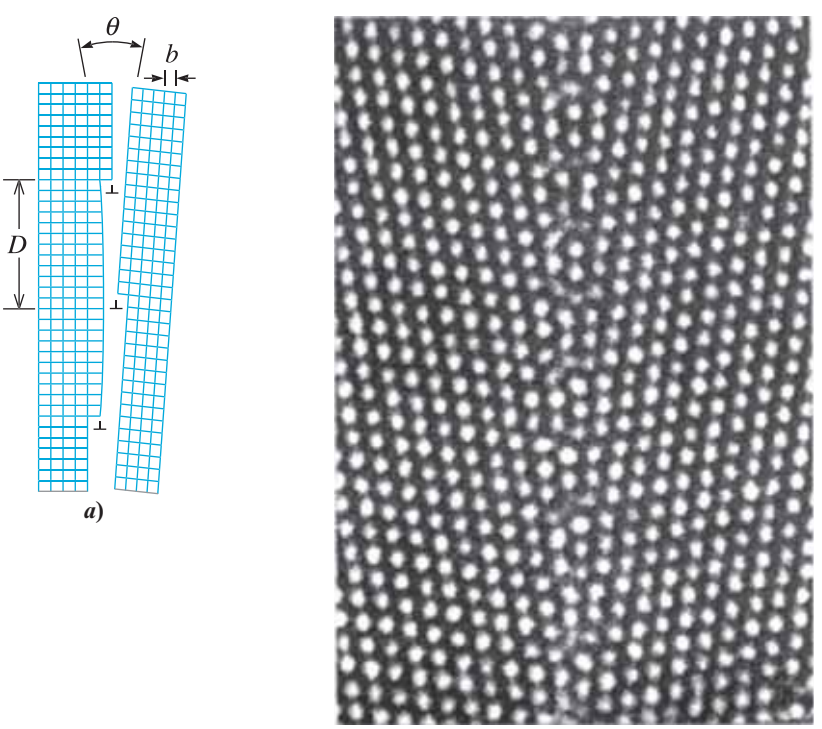


Figura 4-15 *a*) El límite de grano de ángulo pequeño se produce por medio de un arreglo de las dislocaciones, lo que provoca un desajuste angular θ entre las redes en cualquier lado del límite. *b*) Micrografía electrónica de transmisión de un límite de grano de ángulo pequeño en el aluminio. (*Cortesía de Ron Gronsky*)

En la porción de la secuencia indicada, un plano del tipo A reemplaza un plano del tipo C. Esta región pequeña, cuya secuencia de apilamiento es CH en lugar de CCCa, representa una falla de apilamiento, las cuales interfieren con el proceso de deslizamiento.

Límites de macla

Un **límite de macla** es un plano a través del cual se produce una desorientación especial de imagen especular de la estructura cristalina (figura 4-16). Los límites de macla pueden producirse cuando una fuerza de corte, que actúa a lo largo del límite de macla, ocasiona que los átomos se desplacen de su posición. Estos límites, que se presentan durante la deformación o el tratamiento térmico de ciertos metales, interfieren con el proceso de deslizamiento e incrementan la resistencia del metal. También se presentan en algunos materiales cerámicos como la zirconia monoclínica y el silicato de dicalcio.

La eficacia de los defectos superficiales para interferir con el proceso de deslizamiento puede juzgarse a partir de las energías superficiales (tabla 4-3). Los límites de grano de alta energía son mucho más eficaces para bloquear las dislocaciones que las fallas de apilamiento o las maclas.

Límites del dominio

Los **ferroeléctricos** son materiales que desarrollan una polarización dieléctrica espontánea y reversible (por ejemplo, el PZT o el $BaTiO_3$) (vea el capítulo 19). Los materiales magnéticos también desarrollan una magnetización de manera similar (por ejemplo, el Fe, Co, Ni, óxido de hierro, etc.) (vea el capítulo 20). Estos materiales electrónicos y magnéticos contienen dominios. Un **dominio** es una región pequeña del material en el que la dirección de la

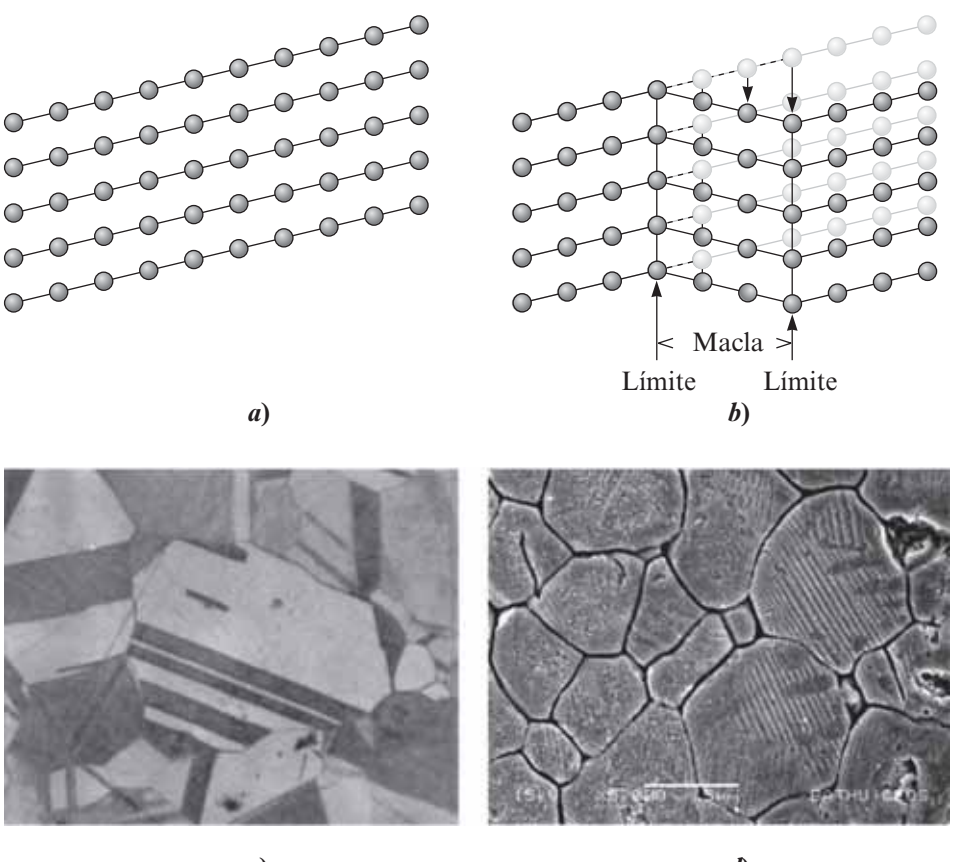


Figura 4-16 La aplicación de un esfuerzo al *a*) cristal perfecto puede provocar un desplazamiento de los átomos, *b*) que resulta en la formación de una macla. Observe que el cristal se ha deformado como resultado del maclado. *c*) Una micrografía de las maclas dentro de un grano de latón (250 ×). (*Reimpresión por cortesía de Don Askeland*) *d*) Dominios en el titanato de bario ferroeléctrico. (*Cortesía del Profesor Chris Bowen*) En los materiales magnéticos se presentan estructuras con dominios similares.

Tabla 4-3 Energías de las imperfecciones superficiales en algunos metales

Imperfección superficial (J/m^2)	Al	Cu	Pt	Fe
Falla de apilamiento	0.2	0.075	0.095	—
Límite de macla	0.12	0.045	0.198	0.19
Límite de grano	0.625	0.645	1.000	0.78

magnetización o de la polarización dieléctrica permanece igual. En estos materiales se forman varios dominios pequeños, lo que minimiza su energía libre total. La figura 4-16*d*) muestra un ejemplo de los dominios en el titanato de bario ferroeléctrico tetragonal. La presencia de los dominios influye en las propiedades dieléctricas y magnéticas de muchos materiales electrónicos y magnéticos. En capítulos posteriores se explicarán estos materiales.

4-8 Importancia de los defectos

Los defectos extendidos y los puntuales desempeñan una función principal, pues influyen en las propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas y magnéticas de los materiales de ingeniería. En esta sección se recapitula la importancia de los defectos sobre las propiedades de los materiales. Se hace hincapié en que el efecto de las dislocaciones es el más importante sobre los materiales metálicos.

Efecto sobre las propiedades mecánicas mediante el control del proceso de deslizamiento

Cualquier imperfección en el cristal incrementa la energía interna en el punto de la imperfección. La energía local aumenta debido a que, cerca de la imperfección, los átomos se acercan de manera estrecha (compresión) o son forzados a separarse demasiado (tensión).

Una dislocación en un cristal metálico que de otra manera sería perfecto puede moverse con facilidad a través de éste si el esfuerzo cortante resuelto es igual al esfuerzo cortante resuelto crítico. Sin embargo, si la dislocación se encuentra en una región donde los átomos están desplazados de sus posiciones usuales, se necesita de un esfuerzo mayor para forzar el paso de la dislocación por la región de energía local alta; por lo tanto, el material es más resistente. *Los defectos en los materiales, como las dislocaciones, los defectos puntuales y los límites de grano funcionan como "señales de alto" para las dislocaciones*. Oponen resistencia al movimiento de éstas y cualquier mecanismo que lo haga otorga mayor resistencia a los metales. Por lo tanto, se puede controlar la resistencia de un material metálico si se controla el número y tipo de imperfecciones. Tres mecanismos comunes de endurecimiento se basan en las tres categorías de defectos que muestran los cristales. Dado que el movimiento de las dislocaciones es relativamente más fácil en los metales y aleaciones, por lo general estos mecanismos funcionan mejor en los materiales metálicos. Se debe tener en cuenta que, con mucha frecuencia, la resistencia de las cerámicas en tensión y a temperaturas bajas la determina el nivel de porosidad (presencia de orificios pequeños). Es muy común que los polímeros sean amorfos, y por lo tanto las dislocaciones desempeñan una función muy pequeña en su comportamiento mecánico, como se explica en un capítulo posterior. La resistencia de los vidrios inorgánicos (por ejemplo, el vidrio flotado de silicato) depende de la distribución de los defectos en sus superficies.

Endurecimiento por deformación

Las dislocaciones afectan la perfección de la estructura cristalina. En la figura 4-17, los átomos ubicados en el punto *B*, es decir por debajo de la línea de la dislocación, están comprimidos, mientras que los átomos de arriba de ese punto están muy separados. Si se mueve a la derecha la dislocación *A* y pasa cerca de la dislocación *B*, la fisura encontrará una región donde los átomos no están arreglados de manera apropiada. Se requieren mayores esfuerzos para que la segunda dislocación siga en movimiento; en consecuencia, el metal debe ser más resistente. El incremento del número de dislocaciones incrementa la resistencia del material, dado que el aumento de la densidad de las dislocaciones provoca más señales de alto para el movimiento de éstas. Puede demostrarse que la densidad de dislocaciones aumenta de manera notable a medida que deforma el material. A este mecanismo para incrementar la resistencia de un material por medio de la deformación se le conoce como **endurecimiento por deformación**, tema que

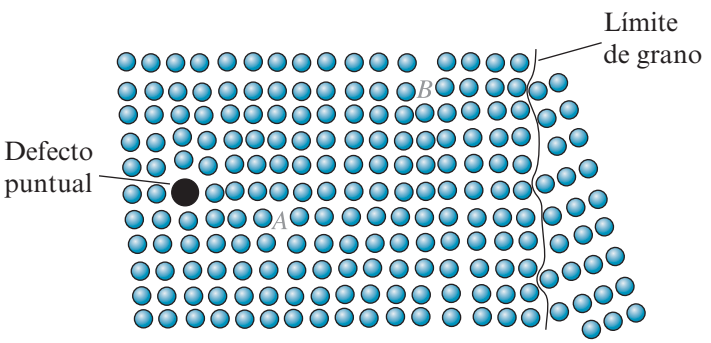


Figura 4-17 Si la dislocación se mueve hacia la izquierda en el punto *A*, es bloqueada por el defecto puntual. Si se mueve hacia la derecha, interacciona con la red alterada cerca de la segunda dislocación en el punto *B*. Si la dislocación se mueve más hacia la derecha, es bloqueada por un límite de grano.

se explica en el capítulo 8. También puede demostrarse que es posible reducir de forma significativa las densidades de las dislocaciones si se calienta un material metálico a una temperatura relativamente alta (debajo de la temperatura de fusión) durante un largo periodo. A este tratamiento térmico se le conoce como **recocido** y se utiliza para proporcionar ductilidad a los materiales metálicos. Por lo tanto, el control de la densidad de las dislocaciones es un mecanismo importante para controlar la resistencia y ductilidad de los metales y aleaciones.

Endurecimiento por solución sólida

Cualquiera de los defectos puntuales también afecta la perfección de la estructura cristalina. Se forma una solución sólida cuando los átomos o iones de un elemento o compuesto huésped son asimilados por completo por la estructura cristalina del material anfitrión. Esto es, similar a la manera en la que la sal o el azúcar en concentraciones pequeñas se disuelven en el agua. Si la dislocación *A* (figura 4-17) se mueve hacia la izquierda se encuentra con un cristal afectado por el defecto puntual; se requieren mayores esfuerzos para que la dislocación continúe su deslizamiento. Si se introducen de manera intencional átomos sustitucionales o intersticiales, se provoca un *endurecimiento por solución sólida*, fenómeno que se explica en el capítulo 10. Este mecanismo explica por qué el acero al carbono no aleado es más resistente que el Fe puro y por qué las aleaciones de cobre que contienen concentraciones pequeñas de Be son mucho más resistentes que el Cu puro. El oro y la plata puros, ambos metales CCCa con varios sistemas de deslizamiento activos, son mecánicamente muy blandos.

Endurecimiento por tamaño de grano

Ciertas imperfecciones de la superficie, como los límites de grano, afectan el arreglo de átomos en los materiales cristalinos. Si la dislocación *B* (figura 4-17) se mueve hacia la derecha, se encuentra con un límite de grano que la bloquea. Cuando en los materiales metálicos aumenta el número de granos o el tamaño de éstos se reduce, se logra el **endurecimiento por tamaño de grano**. El control del tamaño de grano se explicará en varios de los capítulos posteriores.

Existen otros dos mecanismos para incrementar el endurecimiento de los metales y aleaciones. Éstos, a los cuales se les conoce como **endurecimiento de segunda fase** y **endurecimiento por precipitación,** se explicarán en capítulos posteriores.

Ejemplo 4-13 *Diseño/selección de materiales para una estructura estable*

Se debe fabricar un soporte para sostener ladrillos cerámicos en su lugar en un horno de tratamiento térmico. El soporte debe ser resistente, poseer alguna ductilidad, de tal manera que se flexione en vez de fracturarse si se sobrecarga y debe conservar la mayor parte de su resistencia hasta los 600°C. Diseñe el material para construir este soporte, considerando las diversas imperfecciones cristalinas como mecanismos de endurecimiento.

SOLUCIÓN

Para funcionar a 600°C, el soporte *no* debe producirse a partir de un polímero. En su lugar, debe considerarse un metal o una cerámica.

Para tener alguna ductilidad, las dislocaciones deben moverse y ocasionar deslizamiento. Debido a que el deslizamiento en las cerámicas es difícil, el soporte debe producirse a partir de

un material metálico. El metal debe tener un punto de fusión muy por encima de los 600°C; el aluminio, con un punto de fusión de 660°C, no sería adecuado; sin embargo, el hierro sería una elección razonable.

Si se introducen imperfecciones puntuales, lineales y superficiales en el hierro, se incrementa la resistencia, pero se desea que las imperfecciones sean estables a medida que se incrementa la temperatura. Como se muestra en el capítulo 8, los granos pueden crecer a altas temperaturas, reducir el número de los límites de grano y provocar una disminución de la resistencia. Las dislocaciones pueden eliminarse a altas temperaturas, de nuevo mediante la reducción de la resistencia. El número de vacancias depende de la temperatura, por lo que el control de los defectos cristalinos puede no producir propiedades estables.

Sin embargo, el número de átomos intersticiales o sustitucionales en el cristal no cambia con la temperatura. Se podría adicionar carbono al hierro como átomos intersticiales o átomos de vanadio sustitutos de los átomos de hierro en los puntos de red normales. Estos defectos puntuales continúan interfiriendo con el movimiento de las dislocaciones y ayudan a mantener estable la resistencia.

Por supuesto, también pueden ser importantes otros requerimientos de diseño. Por ejemplo, el soporte de acero puede deteriorarse por la oxidación o reaccionar con el ladrillo cerámico.

Efectos sobre las propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas

En las secciones anteriores se enunció que las consecuencias de los defectos puntuales sobre las propiedades eléctricas de los semiconductores son drásticas. Toda la industria de la microelectrónica depende de manera crítica de la incorporación exitosa de dopantes sustitucionales como el P, As, B y Al en el Si y otros semiconductores. Estos átomos dopantes permiten ejercer un control significativo sobre las propiedades eléctricas de los semiconductores. Los dispositivos fabricados con Si, GaAs, silicio amorfo (a:Si:H), etc., dependen de manera crítica de la presencia de átomos dopantes. Se puede formar Si del tipo *n* si se le agregan átomos de P y del tipo *p* si se le adicionan átomos de B. De manera similar, varios de los enlaces del silicio amorfo que de otra manera no serían satisfactorios se completan cuando se les incorporan átomos de H.

Por lo general, el efecto de los defectos —como las dislocaciones— sobre las propiedades de los semiconductores es perjudicial. Las dislocaciones y otros defectos (entre ellos otros defectos puntuales) pueden interferir con el movimiento de los portadores de carga eléctrica de los semiconductores. Esta es la razón por la que se asegura que las densidades de las dislocaciones del silicio monocristalino y otros materiales que se usan en aplicaciones ópticas y eléctricas son muy pequeñas. Los defectos puntuales también provocan el incremento de la resistividad de los metales.

En algunos casos los defectos pueden mejorar ciertas propiedades. Por ejemplo, la incorporación de CaO en la ZrO_2 provoca un incremento de la concentración de las vacancias del ion oxígeno. Este es un efecto beneficioso para la conductividad de la zirconia, pues permite el uso de tales compuestos para fabricar sensores de gas oxígeno y celdas de combustible de óxido sólido. ¡Los defectos pueden convertir muchos materiales dieléctricos aislantes en semiconductores útiles! Éstos se utilizan para muchas aplicaciones de sensores (por ejemplo, sensores de temperatura, humedad y gases, etcétera).

La adición de alrededor de 1% de óxido de cromo en la alúmina crea defectos que le dan a este material un color rojo rubí. De manera similar, la incorporación de Fe^{2+} y Ti^{4+} colorea de azul al zafiro. Los nanocristales de materiales como el sulfuro de cadmio (CdS) en los vidrios orgánicos les conceden a éstos un color brillante.

Los nanocristales de haluro de plata y otros cristales también permiten la formación de vidrios fotocrómicos y fotosensibles.

Muchos materiales magnéticos pueden procesarse de tal manera que los límites de grano y otros defectos dificultan revertir su magnetización. Las propiedades magnéticas de muchas ferritas comerciales, que se usan en imanes para bocinas y dispositivos de redes de comunicación inalámbrica, dependen de manera crítica de la distribución de los distintos iones en los diferentes sitios cristalográficos en la estructura cristalina. Como ya se mencionó, la presencia de dominios afecta las propiedades de los materiales ferroeléctricos, ferromagnéticos y ferrimagnéticos (capítulos 19 y 20).

Resumen

- Las imperfecciones, o defectos, en un material cristalino son de tres tipos generales: defectos puntuales, defectos lineales o dislocaciones, y defectos superficiales.
- El número de vacancias depende de la temperatura del material; con frecuencia se introducen de manera deliberada átomos intersticiales (localizados en los sitios intersticiales entre los átomos normales) y átomos sustitucionales (los cuales reemplazan los átomos huéspedes en los puntos de red) que por lo general no son afectados por los cambios de temperatura.
- Las dislocaciones son defectos lineales que, cuando se aplica una fuerza a un material metálico, se mueven y provocan que un material metálico se deforme.
- El esfuerzo cortante resuelto crítico es el esfuerzo que se requiere para mover la dislocación.
- Las dislocaciones se mueven en un sistema de deslizamiento, compuesto por un plano de deslizamiento y una dirección de deslizamiento. Por lo general, la dirección de deslizamiento es una dirección compacta. Normalmente, el plano de deslizamiento también es compacto o casi compacto.
- En los cristales metálicos, el número y tipo de direcciones de deslizamiento y de planos de deslizamiento influyen en las propiedades del metal. En los metales CCCa, el esfuerzo cortante resuelto crítico es bajo y hay un número óptimo de planos de deslizamiento; en consecuencia, los metales CCCa tienden a ser dúctiles. Los metales CCCu no disponen de planos compactos y el esfuerzo cortante resuelto crítico es alto; por lo tanto, los metales CCCu tienden a ser resistentes. El número de sistemas de deslizamiento en los metales CH es limitado, lo que ocasiona que estos materiales por lo general se comporten de manera quebradiza.
- Los defectos puntuales, que incluyen las vacancias, los átomos intersticiales y los átomos sustitucionales, introducen campos de deformación por compresión o tensión que afectan los arreglos atómicos en el cristal circundante. Como resultado, las dislocaciones no pueden deslizarse con facilidad en la proximidad de los defectos puntuales, es decir, aumenta la resistencia del material metálico.
- Los defectos superficiales incluyen los límites de grano. Cuando el tamaño de grano es muy pequeño, se incrementa la cantidad del área de los límites de grano; debido a que las dislocaciones no pueden pasar con facilidad a través de un límite de grano, el material se endurece (ecuación de Hall-Petch).
- El número y tipo de los defectos cristalinos controlan la facilidad de movimiento de las dislocaciones y, por lo tanto, influyen de manera directa en las propiedades mecánicas del material.
- Los defectos de los materiales tienen una influencia significativa sobre sus propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas.

Glosario

Análisis de imágenes Técnica que se utiliza para analizar imágenes de microestructuras con el fin de obtener información cuantitativa sobre el tamaño y la forma del grano, la distribución de los tamaños de los granos, etcétera.

ASTM American Society for Testing and Materials.

Defecto de Frenkel Par de defectos puntuales que se produce cuando se mueve un ion para crear un sitio intersticial, a la vez que se deja una vacancia.

Defecto de Schottky Defecto puntual en los materiales enlazados iónicamente. Para mantener una carga neutra, debe formarse un número estequiométrico de vacancias de los cationes y aniones.

Defecto intersticial Defecto puntual que se produce cuando se coloca un átomo en el cristal en un sitio que por lo general no es un punto de red.

Defecto sustitucional Defecto puntual que se produce cuando se elimina un átomo de un punto de red regular y se reemplaza con un átomo distinto, por lo general de un tamaño diferente.

Defectos puntuales Imperfecciones, como las vacancias, que por lo general se localizan en un sitio de cristal (en algunas ocasiones, en unos cuantos).

Defectos superficiales Imperfecciones, como los límites de grano, que forman un plano bidimensional dentro del cristal.

Defectos extendidos Defectos que involucran varios átomos/iones y por lo tanto ocurren en un volumen finito del material cristalino (por ejemplo, las dislocaciones, las fallas de apilamiento, etcétera).

Deformación elástica Deformación que se recupera por completo cuando se elimina el esfuerzo que la ocasiona.

Deformación plástica Deformación permanente de un material cuando se aplica y después se elimina una carga.

Densidad de las dislocaciones Longitud total de la línea de la dislocación por centímetro cúbico en un material.

Deslizamiento Deformación de un material metálico por el movimiento de las dislocaciones a través del cristal.

Deslizamiento cruzado Cambio en el sistema de deslizamiento de una dislocación.

Dirección de deslizamiento Dirección en el cristal en la que se mueve la dislocación. La dirección de deslizamiento es la misma que la dirección del vector de Burgers.

Dislocación Imperfección de línea en un material cristalino.

Dislocación de arista Dislocación introducida en el cristal cuando se le añade un "medio plano adicional" de átomos.

Dislocación helicoidal Defecto lineal que se produce cuando se tuerce un cristal en un espaciado atómico, de tal manera que se genera una rampa en espiral.

Dislocación mixta Dislocación que contiene componentes de arista y helicoidales.

Dominio Región pequeña de un material ferroeléctrico, ferromagnético o ferrimagnético en el que la dirección de la polarización dieléctrica (en el caso de los ferroeléctricos) o la magnetización (en el de los ferromagnéticos o ferrimagnéticos) se mantienen.

Dopantes Elementos o compuestos que por lo general se adicionan en concentraciones conocidas y aparecen en lugares específicos dentro de una microestructura para mejorar las propiedades o el procesamiento de un material.

Ecuación de Hall-Petch Relación entre el límite elástico y el tamaño de grano de un material metálico, es decir $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$.

Endurecimiento de segunda fase Mecanismo por medio del cual los granos de un compuesto o fase adicional se introducen en un material policristalino. Estos cristales de segunda fase resisten el movimiento de las dislocaciones, por lo que ocasionan un incremento de la resistencia de un material metálico.

Endurecimiento por deformación Endurecimiento de un material por medio del incremento del número de dislocaciones por deformación, o trabajo en frío. También se le conoce como "endurecimiento por trabajo".

Endurecimiento por precipitación Endurecimiento de metales y aleaciones por medio de la formación de precipitados dentro de los granos. Los precipitados pequeños resisten el movimiento de las dislocaciones.

Endurecimiento por tamaño de grano Endurecimiento de un material por medio de la reducción del tamaño del grano, y por lo tanto el incremento del área de los límites de grano.

Esfuerzo cortante resuelto crítico Esfuerzo cortante que se requiere para ocasionar que una dislocación se mueva y provoque un deslizamiento.

Esfuerzo de Peierls-Nabarro Esfuerzo cortante que depende del vector de Burgers y del espaciado interplanar necesario para ocasionar que una dislocación se mueva, es decir, $\tau = c \exp(-kd/b)$.

Falla de apilamiento Defecto superficial en los metales provocado por la secuencia inadecuada de apilamiento inapropiada de los planos compactos.

Ferroeléctrico Material dieléctrico que desarrolla una polarización eléctrica espontánea y reversible (por ejemplo, el PZT y el $BaTiO_3$).

Grano Uno de los cristales presentes en un material policristalino.

Impurezas Elementos o compuestos que encuentran la forma de introducirse en un material; con frecuencia se originan a partir del procesamiento o son propios de la materia prima y por lo general tienen un efecto perjudicial sobre las propiedades o el procesamiento de los materiales.

Intersticialidad Defecto puntual que se produce cuando un átomo "normal" ocupa un sitio intersticial en un cristal.

Ley de Schmid Relación entre el esfuerzo cortante, el esfuerzo aplicado y la orientación del sistema de deslizamiento, es decir, $\tau = \sigma \cos \lambda \cos \phi$.

Límite inclinado Límite de grano de ángulo pequeño compuesto por un arreglo de dislocaciones de arista.

Límite de grano Defecto superficial que representa el límite entre dos granos. El cristal tiene una orientación distinta en cualquier lado del límite de grano.

Límite de grano de ángulo pequeño Arreglo de dislocaciones que ocasiona un pequeño error de orientación del cristal a través de la superficie de la imperfección.

Límite de macla Defecto de superficie mediante el cual se produce una desorientación de imagen especular de la estructura cristalina.

Límite elástico Nivel de esfuerzo sobre el cual un material comienza a mostrar una deformación permanente.

Límite helicoidal Límite de grano de ángulo pequeño compuesto por dislocaciones helicoidales.

Metalografía Preparación de una muestra metálica de un material al que se pule y se lija, de tal manera que la estructura pueda examinarse por medio de un microscopio.

Notación de Kröger-Vink Sistema que se utiliza para señalar defectos puntuales en los materiales. El contenido principal de la notación indica el tipo de defecto o el elemento involucrado. El subíndice señala la ubicación del defecto puntual y el superíndice el efecto positivo ($\cdot$) o la carga negativa ($'$).

Número (*n*) del tamaño de grano ASTM Medida del tamaño de los granos de los materiales cristalinos que se obtiene al contar el número de granos por pulgada cuadrada con una magnificación de 100.

Plano de deslizamiento Plano que recorre la línea de una dislocación durante el deslizamiento. Por lo general, un plano de deslizamiento es un plano compacto, si hay alguno en la estructura cristalina.

Poros de ataque químico Orificios creados en localizaciones donde las dislocaciones coinciden con la superficie.

Ranurado térmico Técnica que se utiliza para observar las microestructuras de los materiales cerámicos, que involucra el calentamiento de una muestra pulida a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de sinterización durante un corto periodo.

Reacciones químicas del defecto Reacciones escritas que utilizan la notación de Kröger-Vink para describir la química del defecto. Las reacciones deben escribirse de tal manera que la masa y las cargas eléctricas estén balanceadas y se conserve la estequiometría de los sitios.

Recocido Tratamiento térmico que por lo general involucra calentar un material metálico a una alta temperatura durante un periodo extenso para disminuir la densidad de las dislocaciones y por lo tanto otorgarle ductilidad.

Sinterización Proceso para formar una masa densa por medio del calentamiento de polvos compactados.

Sistema de deslizamiento Combinación del plano y la dirección del deslizamiento.

Vacancia Átomo o ion ausente en su sitio cristalográfico regular.

Vector de Burgers Dirección y distancia que una dislocación se mueve en cada etapa, también conocido como vector de deslizamiento.

Problemas

Sección 4-1 Defectos puntuales

4-1 El oro tiene 5.82×10^8 vacancias/cm^3 en equilibrio a 300 K. ¿Qué fracción de los sitios atómicos está vacante a 600 K?

4-2 Calcule el número de vacancias por m^3 del oro a 900°C. La energía para formar vacancias es de 0.86 eV/átomo.

4-3 Calcule el número de vacancias por cm^3 esperado del cobre a 1,080°C (justo debajo de la temperatura de fusión). La energía para formar vacancias es de 83,680 J/mol.

4-4 La fracción de los puntos de red que ocupan las vacancias en el aluminio sólido a 660°C es de 10^{-3}. ¿Cuál es la energía que se requiere para crear vacancias en el aluminio?

4-5 La densidad de una muestra de paladio CCCa es de 1,980 kg/m^3 y su parámetro de red es de 0.38902 nm. Calcule

a) la fracción de los puntos de red que contienen vacancias y
b) el número total de vacancias en un centímetro cúbico de Pd.

4-6 La densidad de una muestra de berilio CH es de 1,844 k^3 y los parámetros de red son a_0= 0.22858 nm y c_0 = 0.35842 nm. Calcule
a) la fracción de los puntos de red que contienen vacancias y
b) el número total de vacancias en un centímetro cúbico.

4-7 El litio CCCu tiene un parámetro de red de 0.35089 nm y contiene una vacancia cada 200 celdas unitarias. Calcule
a) el número de vacancias por centímetro cúbico y
b) la densidad del Li.

4-8 El plomo CCCa tiene un parámetro de red de 0.4949 nm y contiene una vacancia cada 500 átomos de Pb. Calcule
a) la densidad y
b) el número de vacancias por gramo de Pb.

4-9 El Cu y el Ni forman una solución sólida sustitucional. Esto significa que la estructura cristalina de una aleación de Cu-Ni consiste en átomos de Ni que sustituyen los átomos de Cu en las posiciones atómicas regulares de la estructura CCCa. En una aleación de 30% en peso Cu-Ni, ¿qué fracción de los sitios atómicos ocupa el Ni?

4-10 El Au y la Ag forman una solución sólida sustitucional. Esto significa que la estructura cristalina de una aleación de Au-Ag consiste en átomos de Ag que sustituyen a los átomos de Au en las posiciones atómicas regulares de la estructura CCCa. En una aleación de 50% atómico Au-Ag, ¿cuál es el porcentaje en peso de la Ag en la aleación?

4-11 Se produce una aleación de niobio introduciendo átomos sustitucionales de tungsteno en la estructura CCCu; con el tiempo, se produce una aleación que tiene un parámetro de red de 0.32554 nm y una densidad de 11,950 kg/m^3. Calcule la fracción de los átomos de tungsteno que hay en la aleación.

4-12 Se introducen átomos de estaño en un cristal de cobre CCCa, lo que produce una aleación con un parámetro de red de 0.37589 nm y una densidad de 8,772 kg/m^3. Calcule el porcentaje atómico del estaño presente en la aleación.

4-13 Se reemplaza con tantalio un porcentaje atómico de 7.5 de los átomos de cromo en su cristal CCCu. La difracción de rayos X muestra que el parámetro de red es de 0.29158 nm. Calcule la densidad de la aleación.

4-14 Suponga que se introduce un átomo de carbono cada 100 átomos de hierro en una posición intersticial en el hierro CCCu, lo que da un parámetro de red de 0.2867 nm. Encuentre la densidad y el factor de empaquetamiento de este acero.

4-15 La densidad del hierro CCCu es de 7,882 kg/m^3 y el parámetro de red es de 0.2866 nm cuando se introducen átomos de hidrógeno en las posiciones intersticiales. Calcule
a) la fracción atómica de los átomos de hidrógeno y
b) el número de celdas unitarias en promedio que contienen átomos de hidrógeno.

Sección 4-2 Otros defectos puntuales

4-16 Suponga que se presenta un defecto de Schottky en cada décima celda unitaria de MgO. El MgO tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y un parámetro de red de 0.396 nm. Calcule
a) el número de vacancias de aniones por cm^3 y
b) la densidad de la cerámica.

4-17 El ZnS tiene la estructura de la blenda de zinc. Si la densidad es de 3,020 kg/m^3 y el parámetro de red es de 0.59583 nm, determine el número de defectos de Schottky
a) en cada celda unitaria y
b) por centímetro cúbico.

4-18 Suponga que se introducen los siguientes defectos puntuales.
a) Iones Mg^{+2} que sustituyen los iones itrio en el Y_2O_3.
b) Iones Fe^{+3} que sustituyen los iones magnesio en el MgO.
c) Iones Li^{+1} que sustituyen los iones magnesio en el MgO.
d) Iones Fe^{+2} que reemplazan los iones sodio en el NaCl.

¿Qué otros cambios en cada estructura podrían ser necesarios para conservar un balance de la carga? Explique su respuesta.

4-19 Escriba la ecuación química del defecto para introducir $SrTiO_3$ en el $BaTiO_3$ utilizando la notación de Kröger-Vink.

Sección 4-3 Dislocaciones

4-20 ¿Los materiales amorfos y cristalinos se deforman plásticamente mediante los mismos mecanismos? Explique su respuesta.

4-21 ¿Cuál es la relación entre la orientación del vector de Burguer y el eje de dislocación en los casos de las dislocaciones de arista y helicoidales?

4-22 ¿Qué es un sistema de deslizamiento y qué papel juega en la deformación plástica?

4-23 Dibuje un circuito de Burgers alrededor de las dislocaciones que se muestran en la figura 4-18. Indique de manera clara el vector de Burgers que encuentra. ¿Qué tipo de dislocación es esta?

¿En qué dirección se moverá la dislocación debido al esfuerzo cortante aplicado τ? Relacione sus respuestas con los ejes coordenados que se muestran en la figura.

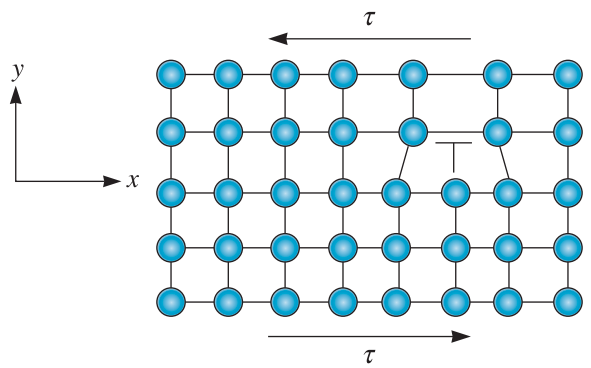


Figura 4-18 Diagrama esquemático de la dislocación del problema 4-23.

4-24 ¿Cuáles son los índices de Miller de las direcciones del deslizamiento:
a) en el plano (111) en una celda unitaria CCCa?
b) en el plano (011) en una celda unitaria CCCu?

4-25 ¿Cuáles son los índices de Miller de los planos del deslizamiento en las celdas unitarias CCCa que incluyen la dirección del deslizamiento [101]?

4-26 ¿Cuáles son los índices de Miller de los planos del deslizamiento {110} en las celdas unitarias CCCu que incluyen la dirección del deslizamiento [111]?

4-27 Calcule la longitud del vector de Burgers en los siguientes materiales:
a) niobio CCCu,
b) plata CCCa y
c) silicio cúbico del diamante.

4-28 Determine el espaciado interplanar y la longitud del vector de Burgers del deslizamiento en los sistemas de deslizamiento esperados en el aluminio CCCa. Repita, bajo el supuesto de que el sistema de deslizamiento es un plano (110) y una dirección $[1\bar{1}1]$. ¿Cuál es la razón entre los esfuerzos cortantes que se requiere para que los dos sistemas se deslicen? Suponga que $k = 2$ en la ecuación 4-2.

4-29 Determine el espaciado interplanar y la longitud del vector de Burgers del deslizamiento en el sistema de deslizamiento $(110)[1\bar{1}1]$ en el tantalio CCCu. Repita, bajo el supuesto de que el sistema de deslizamiento es un sistema $(111)/[1\bar{1}0]$. ¿Cuál es la razón entre los esfuerzos cortantes que se requieren para que los dos sistemas se deslicen? Suponga que $k = 2$ en la ecuación 4-2.

4-30 La estructura cristalina de la figura 4-19 contiene dos dislocaciones *A* y *B*. Si se le aplica un esfuerzo cortante al cristal como se muestra, ¿qué le sucederá a las dislocaciones *A* y *B*?

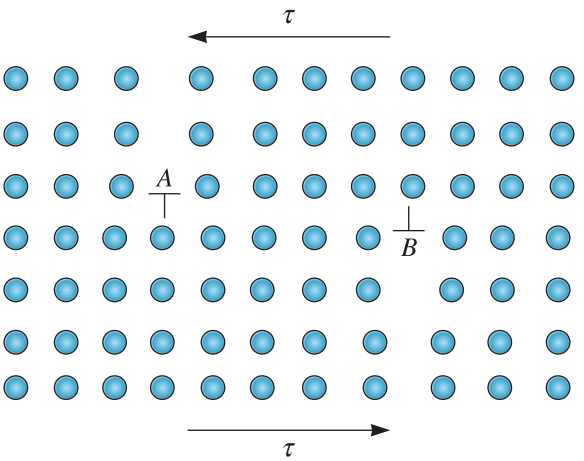


Figura 4-19 Diagrama esquemático de las dos dislocaciones del problema 4-30.

4-31 ***¿Los materiales cerámicos y poliméricos pueden contener dislocaciones?***

4-32 ***¿Por qué son quebradizos los materiales cerámicos?***

Sección 4-4 Importancia de las dislocaciones

4-33 ¿Qué significan los términos deformación plástica y elástica?

4-34 ¿Por qué la resistencia teórica de los metales es mucho mayor que la observada experimentalmente?

4-35 ¿Cuántos gramos de aluminio con una densidad de dislocación de 10^{14} m/m^3 se requieren para dar una longitud de dislocación total que se estiraría de la ciudad de Nueva York a Los Angeles (4,828km)?

4-36 La distancia de la Tierra a la Luna es de 386,242 km. Si ésta fuera la longitud total de una dislocación en un centímetro cúbico de un material, ¿cuál sería la densidad de las dislocaciones? Compare sus respuestas con las densidades de las dislocaciones comunes de los metales.

4-37 ¿Por qué los metales se comportan como materiales quebradizos sin dislocaciones?

4-38 ¿Por qué las dislocaciones desempeñan una función importante en el control de las propiedades mecánicas de los materiales metálicos y sin embargo no desempeñan ninguna función cuando se quieren determinar las propiedades mecánicas de los vidrios?

4-39 Suponga que le gustaría introducir un átomo intersticial o sustitucional grande en un cristal cerca de una dislocación. ¿El átomo cabría con mayor facilidad por encima o por debajo de la línea de

dislocación que se muestra en la figura 4-7*c*)? Explique su respuesta.

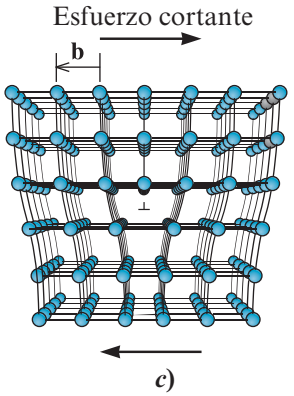


Figura 4-7 *c*) (Repetida del problema 4-39.)

4-40 Compare las razones c/a de los siguientes metales CH, determine el proceso de deslizamiento probable en cada uno y calcule el esfuerzo cortante resuelto crítico aproximado. Explique su respuesta (vea la información en el apéndice A).

a) zinc
b) magnesio
c) titanio
d) zirconio
e) renio
f) berilio

Sección 4-5 Ley de Schmid

4-41 Se estima que el esfuerzo cortante resuelto que opera en una dirección/plano de deslizamiento dado es $\tau_r = \sigma \cos\lambda \cos\varphi$. Si alguno de estos ángulos es igual a 90°, ¿qué sucedería con las dislocaciones involucradas?

4-42 Un monocristal de un metal CCCa está orientado de tal manera que la dirección [001] es paralela a un esfuerzo aplicado de 34.47 MPa. Calcule el esfuerzo cortante resuelto que actúa sobre el plano del deslizamiento (111) en las direcciones de deslizamiento $[\bar{1}10]$ y $[10\bar{1}]$. ¿Cuál(es) sistema(s) de deslizamiento se activará(n) primero?

4-43 Un monocristal de un metal CCCu está orientado de tal manera que la dirección [001] es paralela al esfuerzo aplicado. Si la tensión cortante resuelta crítica que se requiere para el deslizamiento es de 82.74 MPa, calcule la magnitud del esfuerzo aplicado que se necesita para provocar que inicie el deslizamiento en la dirección $[1\bar{1}1]$ en los planos de deslizamiento (110), (011) y $(10\bar{1})$.

4-44 Un cristal sencillo de plata está orientado de tal manera que el plano de deslizamiento (111) es perpendicular a un esfuerzo aplicado de 50 MPa. Enumere los sistemas de deslizamiento compuestos por planos compactos y direcciones que pueden activarse debido a esta tensión aplicada.

Sección 4-6 Influencia de la estructura cristalina

4-45 ¿Por qué son dúctiles el cobre monocristalino y el policristalino, pero el zinc monocristalino, no así el policristalino, puede exhibir una ductilidad considerable?

4-46 Explique por qué los metales hexagonales compactos tienden a presentar una capacidad limitada de endurecimiento por deformación?

4-47 ¿Por qué el deslizamiento cruzado en los metales CCCu y CCCa es más sencillo que en los metales CH? ¿Cómo influye este fenómeno en la ductilidad de los metales CCCu, CCCa y CH?

4-48 Ordene los siguientes metales en el orden esperado de ductilidad incremental: Cu, Ti y Fe. Explique su respuesta.

Sección 4-7 Defectos superficiales

4-49 ¿Cuáles son las imperfecciones de arreglo atómico que tienen un efecto significativo en el comportamiento del material? Proporcione un ejemplo de cada una.

4-50 La resistencia del titanio es de 448.16 MPa cuando el tamaño de grano es de 17.02 μm y 565.4 MPa cuando el tamaño de grano es de 0.8 μm. Determine

a) las constantes de la ecuación de Hall-Petch y
b) la resistencia del titanio cuando se reduce el tamaño del grano a 0.203 μm.

4-51 Una aleación de cobre-zinc tiene las siguientes propiedades:

Diámetro del grano (mm)	Resistencia (MPa)
0.015	170 MPa
0.025	158 MPa
0.035	151 MPa
0.050	145 MPa

Determine

a) las constantes de la ecuación de Hall-Petch y
b) el tamaño de grano que se requiere para obtener una resistencia de 200 MPa.

4-52 Calcule el número de tamaño de grano ASTM si se cuentan 77,500 granos/m^2 en la fotografía de un metal con un aumento de 100.

4-53 ¿Cuál sería el número de tamaño de grano ASTM si se documentan 23 granos con un aumento de 250 en una fotografía con un área de 5,040 mm^2?

4-54 Tiene la opción de comprar una aleación de cobre con un número de tamaño de grano ASTM de 5 o de 8. No puede decidir la magnitud de la diferencia que existe entre ambas. Determine cuántos granos/m^2 aparecerían en una fotografía con aumento de 100 de un metal, dadas estas dos opciones de número de tamaño de grano ASTM. ¿Encuentra diferencias significativas?

4-55 El informe de prueba MTR de un acero estructural que está considerando para un puente peatonal elevado tiene un tamaño de grano ASTM

de 1.5. ¿Incluiría el acero para este proyecto en particular? Explique su respuesta.

4-56 Para un número del tamaño de grano ASTM de 8, calcule el número de granos por pulgada cuadrada
a) con un aumento de 100 y
b) sin ningun aumento.

4-57 Determine el número ASTM del tamaño de grano si se observan 31,000 granos/m^2 con un aumento de 400.

4-58 Determine el número ASTM del tamaño de grano si se observan 38,750 granos/m^2 con un aumento de 50.

4-59 Determine el número ASTM del tamaño de grano de los materiales incluidos en las figuras 4-14 y 4-20.

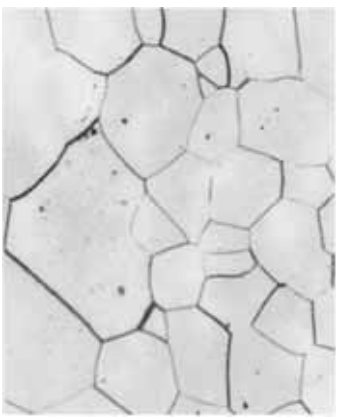


Figura 4-14 Microestructura del paladio (100 ×) [*Del* ASM Handbook, *vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asinternational.org.*] (Repetida para el problema 4-59.)

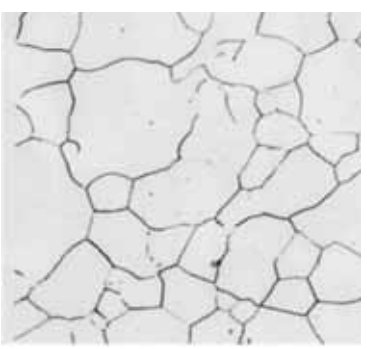


Figura 4-20 Microestructura del hierro. [*Del* ASM Handbook, *Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*] (Problema 4-59.)

4-60 Ciertas cerámicas con propiedades dieléctricas especiales se utilizan en los sistemas de comunicación inalámbrica. El tantalato de bario magnesio (BMT) y el tantalato de bario zinc (BZT) son ejemplos de tales materiales. Determine el número ASTM del tamaño de grano de la microestructura que se muestra en la figura 4-21 de una cerámica de tantalato de bario magnesio (BMT).

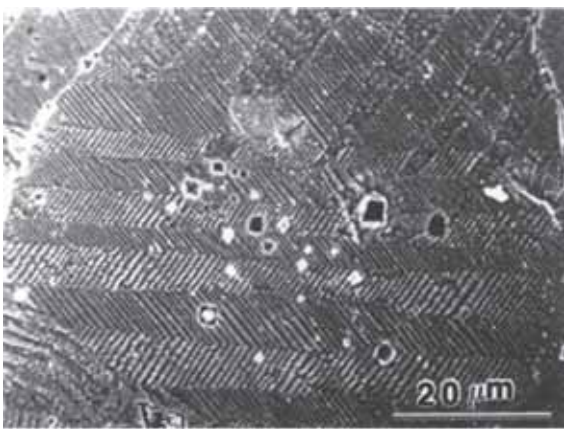


Figura 4-21 Microestructura de una cerámica de tantalato de bario magnesio (BMT). (*Cortesía reimpresa de Don Askeland*) (Problema 4-60.)

4-61 El ángulo θ de un límite inclinado está dado por sen $(\theta/2) = b/(2D)$. [Vea la figura 4-15*a*).] Verifique la exactitud de esta ecuación.

4-62 Calcule el ángulo θ de un límite de grano de ángulo pequeño del aluminio CCCa cuando las dislocaciones están separadas 5,000 Å. [Vea la figura 4-15*a*) y la ecuación del problema 4-61.]

4-63 Calcule la distancia promedio entre las dislocaciones en un límite de grano de ángulo pequeño inclinado 0.50° del hierro CCCu. [Vea la figura 4-15*a*).]

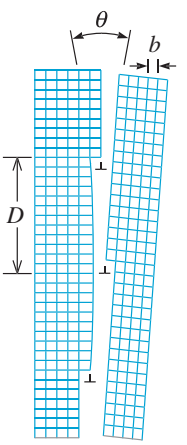


Figura 4-15 *a*) El límite de grano de ángulo pequeño se produce por medio de un arreglo de las dislocaciones, que provoca un desajuste angular θ entre las redes en cualquier lado del límite. (Repetida de los problemas 4-61, 4-62 y 4-63.)

Sección 4-8 Importancia de los defectos

4-64 La resistencia de los metales involucrados en una aleación se incrementa. ¿Este enunciado es verdadero o falso? Explique su respuesta.

4-65 ¿Cómo se incrementa la resistencia de los materiales mediante el endurecimiento por deformación, por tamaño de grano y por aleación? ¿Qué tienen en común estos mecanismos? ¿Podría emplearse más de uno de ellos en una aleación? Explique su respuesta.

4-66 ¿Qué hace que el acero al carbono no aleado sea más duro que el hierro puro?

4-67 ¿Por qué la joyería se hace de oro o plata en aleación con cobre?

4-68 ¿Por qué se prefiere usar cristales semiconductores que contienen la menor cantidad posible de dislocaciones?

4-69 ¿Por qué se utilizan aleaciones en lugar de metales puros en las aplicaciones estructurales (por ejemplo, el acero para puentes y edificios o las aleaciones de aluminio para aviones)?

4-70 Suponiendo que pudiéramos obtener una solución sólida de 1% de peso de cada uno de los siguientes elementos en el aluminio, ¿cuál de ellos produciría el mayor efecto de endurecimiento?: Mg, Mn, Cu y Zn. Explique su respuesta.

4-71 ¿Las dislocaciones controlan la resistencia de un vidrio de silicato? Explique su respuesta.

4-72 ¿Qué significa el término endurecimiento por deformación?

4-73 ¿Con cuál mecanismo de endurecimiento se relaciona la ecuación de Hall-Petch?

4-74 Se endurece cobre puro por medio de la adición de una pequeña concentración de Be. ¿Cómo se llama este mecanismo de endurecimiento?

Problemas de diseño

4-75 Se espera que la densidad del aluminio puro calculada a partir de la información cristalográfica sea de 2,699.55 kg/m^3.

a) Diseñe una aleación de aluminio que tenga una densidad de 2,645 kg/m^3.

b) Diseñe una aleación de aluminio que tenga una densidad de 2,745 kg/m^3.

4-76 Desea utilizar una placa metálica con buena soldabilidad. Durante el proceso de soldado, se calienta el metal próximo a la soldadura casi a la temperatura de fusión y, con base en los parámetros de soldado, puede permanecer caliente durante algún tiempo. Diseñe una aleación que minimice la pérdida de resistencia en esta "zona afectada por el calor" durante el proceso de soldado.

4-77 Se necesita un material que sea ópticamente transparente pero eléctricamente conductivo. Tales materiales se usan para pantallas táctiles. ¿Qué tipo de materiales pueden usarse para esta aplicación? (*Sugerencia*: piense en los recubrimientos de los materiales que pueden proporcionar conductividad electrónica o iónica; el sustrato de esta aplicación debe ser transparente.)

Problemas por computadora

4-78 *Concentraciones de vacancias y su dependencia de la temperatura*. Edite un programa de cómputo que le proporcionará a un usuario la concentración de equilibrio de las vacancias en un elemento metálico como función de la temperatura. El usuario debe especificar un intervalo de temperaturas significativo y válido (por ejemplo, de 100 a 1,200 K para el cobre). Suponga que la estructura cristalina especificada originalmente es válida para este intervalo de temperatura. Pida al usuario que introduzca la energía de activación para formar un mol de las vacancias (Q_v). El programa debe pedirle al usuario que introduzca la densidad del elemento y la estructura cristalina (CCCa, CCCu, etc.). Puede utilizar variables como caracteres para detectar el tipo de estructuras cristalinas (por ejemplo, "F" o "f" para la CCCa, "B" o "b" para la CCCu, etc.). Asegúrese de poner atención a las unidades correctas para la temperatura, densidad, etc. El programa debe preguntarle al usuario si el intervalo de temperatura que ha proporcionado está en °C, °F o K y convertir las temperaturas de manera apropiada a K antes de que se realice algún cálculo. El programa debe emplear esta información para establecer el número de átomos por unidad de volumen y proporcionar una salida para este valor. Además, debe calcular la concentración de equilibrio de las vacancias a distintas temperaturas. La primera temperatura será la temperatura mínima especificada y entonces la temperatura debe incrementarse en 100 K u otro incremento conveniente. Puede usar cualquier software gráfico para trazar la información que muestre la concentración de equilibrio de las vacancias como una función de la temperatura. Piense acerca de qué escalas utilizará para mostrar mejor los resultados.

4-79 *Ecuación de Hall-Petch*. Edite un programa de cómputo que le pida al usuario introducir dos conjuntos de valores de σ_y y del tamaño de grano d) de un material metálico. El programa debe utilizar la información para calcular e imprimir la ecuación de Hall-Petch. Además,

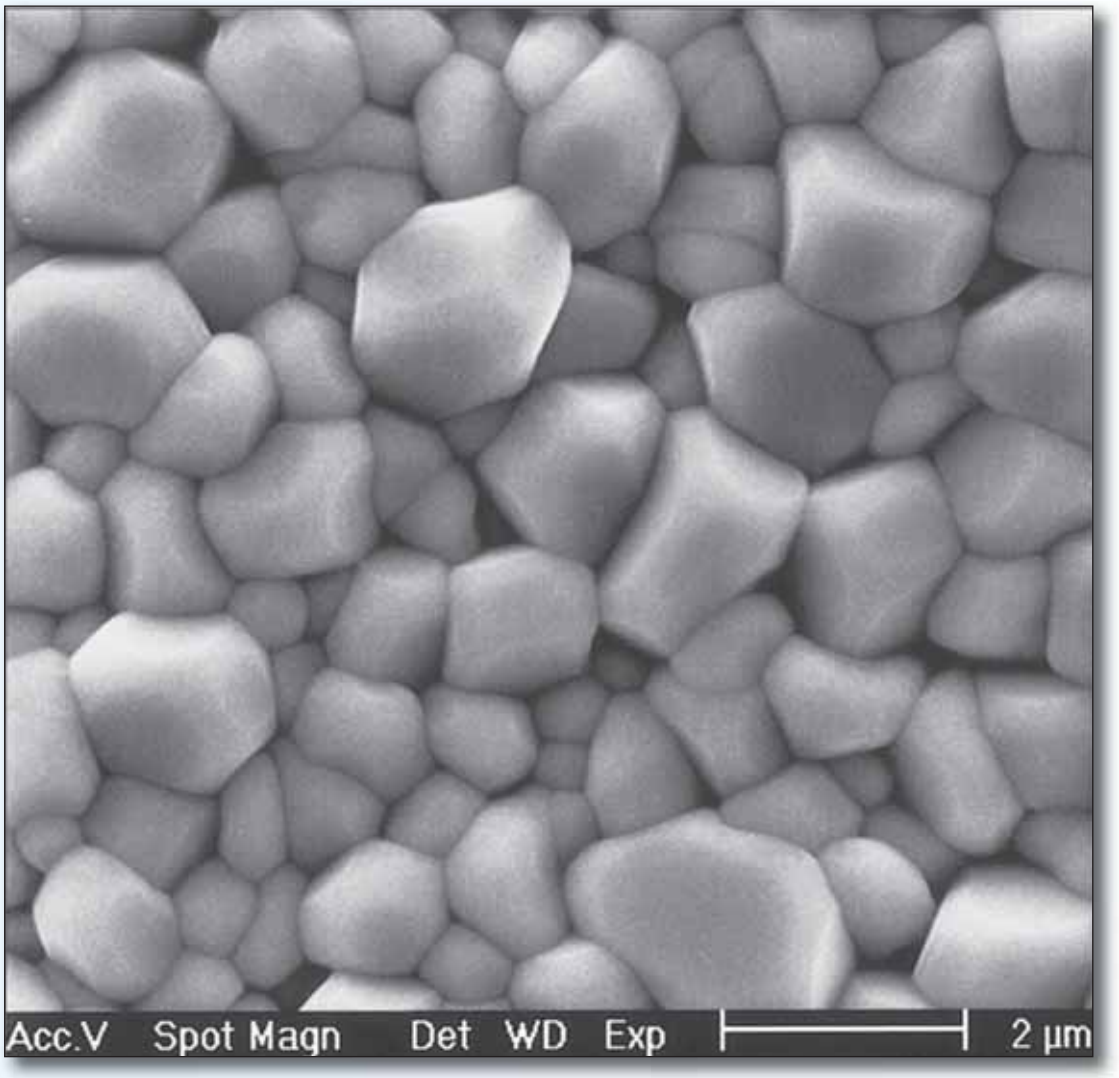
debe pedirle al usuario que introduzca otro valor del tamaño de grano y calcular el límite elástico o viceversa.

4-80 *Calculador del número ASTM del tamaño de grano*. Diseñe un programa de cómputo que le pida al usuario que introduzca el aumento de una micrografía de la muestra para la que se está calculando el número ASTM. El programa debe pedirle al usuario el número de granos contados y el área (en pulgadas cuadradas) a partir de la cual se contaron estos granos. Además, debe calcular el número ASTM, con base en el hecho de que el aumento de la micrografía no es de 100 y el área puede no haber sido una pulgada cuadrada.

Problemas Knovel[MR]

K4-1 Describa el problema asociado con las impurezas metálicas que pueden encontrarse en los dispositivos de silicio.

K4-2 ¿Cuáles son los procesos involucrados en la eliminación de las impurezas metálicas de los dispositivos de silicio por medio de la absorción metálica?



Microestructura de una cerámica sinterizada de tantalato de bario y magnesio (BMT). Este material cerámico es útil para fabricar los componentes electrónicos que se usan en las comunicaciones inalámbricas. El proceso de sinterización es generado por la difusión de los átomos o iones. (*Cortesía de H. Shirey*)

CAPÍTULO

5

Movimientos de átomos e iones en los materiales

Se ha preguntado alguna vez:

- *Si el aluminio se oxida con mayor facilidad que el hierro, ¿por qué se dice que, por lo general, no se "corroe"?*
- *¿Cómo se endurecen las superficies de ciertos aceros?*
- *¿Quién inventó los lentes de contacto?*
- *¿Cómo falla un filamento de tungsteno en una bombilla eléctrica?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Comprender las fuerzas impulsoras de la difusión en los sólidos.
- Calcular el número de vacancias en un sólido y su coeficiente de difusión utilizando la relación de Arrhenius.
- Explicar los mecanismos de difusión en los sólidos.
- Calcular el flujo neto de los átomos por gradiente de concentración con base en la primera ley de Fick.
- Explicar los factores que influyen en la difusión, como temperatura, difusividad, tiempo, concentración y estructura cristalina.
- Diseñar perfiles de difusión y tratamientos térmicos con base en la segunda ley de Fick.
- Explicar la dependencia que tiene la difusión de la sinterización y del crecimiento de grano.

En el capítulo 4 se aprendió que los arreglos atómicos y iónicos en los materiales nunca son perfectos. También se explicó que la mayoría de los materiales de ingeniería no son elementos puros; son aleaciones o mezclas de distintos elementos o compuestos. Por lo general, los distintos tipos de átomos o iones se "difunden", o se mueven dentro del material, por lo que se minimizan las diferencias entre sus concentraciones. La **difusión** se refiere a un flujo neto observable de átomos u otras especies. Depende del gradiente de la concentración y la temperatura. Al igual que el agua fluye de una montaña hacia el mar

para minimizar su energía potencial gravitacional, los átomos e iones tienen una tendencia a moverse de manera predecible para eliminar las diferencias entre las concentraciones y producir composiciones homogéneas que otorgan al material mayor estabilidad termodinámica.

En este capítulo aprenderá que la temperatura influye en la cinética de la difusión y que la diferencia entre las concentraciones contribuye al flujo neto total de la difusión de las especies. El objetivo de este capítulo es examinar los principios y las aplicaciones de la difusión en los materiales. Se ilustrará el concepto de difusión mediante ejemplos de varias tecnologías del mundo real que dependen de la difusión de átomos, iones o moléculas.

También se presenta una sinopsis de las leyes de Fick que describen cuantitativamente el proceso de difusión. Además, se verá la forma en que la accesibilidad relativa de distintas estructuras cristalinas y el tamaño de los átomos o iones, la temperatura y la concentración de las especies que se difunden afectan la velocidad a la que ocurre la difusión. Se expondrán ejemplos específicos de la forma en que se emplea la difusión para sintetizar y procesar materiales avanzados, así como también para fabricar componentes utilizando materiales avanzados.

5-1 Aplicaciones de la difusión

Difusión

La difusión se refiere al flujo neto de cualquier especie, como iones, átomos, electrones, orificios (capítulo 19) y moléculas. La magnitud de este flujo depende del gradiente de concentración y de la temperatura. El proceso de difusión es de gran importancia para una gran variedad de importantes tecnologías actuales. Las tecnologías del procesamiento de materiales conceden gran importancia al control sobre la difusión de los átomos, iones, moléculas y otras especies. Existen cientos de aplicaciones y tecnologías que dependen del incremento o limitación de la difusión. Los siguientes son algunos ejemplos.

Carburización para endurecer la superficie de los aceros

Se desea endurecer una superficie, como el diente de un engrane; sin embargo, no se desea endurecer toda la pieza. Se puede utilizar el proceso de carburización para lograr este objetivo. Mediante ella, se difunde una fuente de carbono, como un polvo de grafito o una fase gaseosa que contenga carbono, en los componentes de acero, en este caso, los engranes (figura 5-1). El incremento de la concentración de carbono en la superficie del acero incrementa la dureza de éste porque los átomos de carbono ubicados en sitios intersticiales obstaculizan los movimientos de dislocación. De manera similar a la introducción de carbono, también se puede utilizar un proceso conocido como **nitruración**, en el que se aplica nitrógeno en la superficie de un material metálico. La difusión también desempeña una función muy importante para controlar las transformaciones de fase necesarias para el tratamiento térmico de metales y aleaciones, el procesamiento de cerámicas y la solidificación y unión de materiales (vea la sección 5-9).

Difusión de dopantes en dispositivos semiconductores

Toda la industria microelectrónica, como la conocemos en la actualidad, no existiría si no se comprendiera del todo la difusión de los distintos átomos en el silicio u otros semiconductores. La creación de la *unión p-n* (capítulo 19) involucra la difusión de átomos dopantes, como el fósforo, arsénico, antimonio, boro, aluminio, etc., en regiones definidas de manera precisa de las obleas de silicio. Algunas de estas regiones son tan pequeñas que se miden mejor en nanómetros. Una unión *p-n* es una región del semiconductor, un lado de la cual tiene dopantes del tipo *n* (por ejemplo, As en Si) y el otro lado contiene dopantes del tipo *p* (por ejemplo, B en Si).

Figura 5-1 Horno para el tratamiento térmico del acero que utiliza el proceso de carburización. (*Cortesía de Arrow Gear Company*)

Cerámicas conductoras

En general, las cerámicas policristalinas tienden a ser buenas aislantes de la electricidad. La difusión de iones, electrones u orificios también desempeña una función importante en la conductividad eléctrica de muchas **cerámicas conductoras**, como la zirconia (ZrO_2) parcial o completamente estabilizada, o el óxido de indio y estaño (también conocido como ITO). El óxido de litio y cobalto ($LiCoO_2$) es un ejemplo de un material iónicamente conductor que se emplea en las baterías de ion litio. Estos materiales iónicamente conductores se usan para fabricar productos como sensores de oxígeno en automóviles, pantallas táctiles, celdas de combustible y baterías. La capacidad de los iones para difundirse y convertirse en una vía para la conducción eléctrica desempeña una función importante que permite estas aplicaciones.

Fabricación de botellas de plástico para bebidas

La difusión puede no ser siempre beneficiosa. En algunas aplicaciones se puede desear poner un límite a su ocurrencia en el caso de ciertas especies. Por ejemplo, una de las condiciones que subyacen a la fabricación de ciertos envases de plástico es que estos deben minimizar la difusión del dióxido de carbono (CO_2). ¡Esta es una de las razones principales por las que se utiliza tereftalato de polietileno (PET) para fabricar botellas que aseguren que las bebidas carbonatadas que lo contienen no perderán su efervescencia durante un periodo razonable!

Oxidación del aluminio

Es probable que haya escuchado o sepa que el aluminio no se "corroe". En realidad, el aluminio se oxida (corroe) con mayor facilidad que el hierro; sin embargo, el óxido de aluminio (Al_2O_3) forma un recubrimiento delgado pero muy protector sobre la superficie del material que previene cualquier otra difusión de oxígeno y que impide la oxidación posterior del aluminio subyacente. El recubrimiento del óxido no tiene color y es delgado y, por lo tanto, invisible. Esta es la razón por la que se piensa que el aluminio no se corroe.

Recubrimientos de barrera térmica para álabes de turbinas

Algunos de los álabes de las turbinas de los motores de aeronaves basados en una superaleación de níquel se recubren con óxidos cerámicos, como la zirconia estabilizada con itria (YSZ). Estos recubrimientos cerámicos protegen la aleación subyacente de las altas temperaturas; de ahí el nombre de **recubrimientos de barrera térmica** (**RBT**) (figura 5-2). La difusión del oxígeno a través de estos recubrimientos cerámicos y la oxidación subsecuente de la aleación subyacente desempeñan una función principal en la determinación del tiempo de vida y la durabilidad de los álabes de las turbinas. En

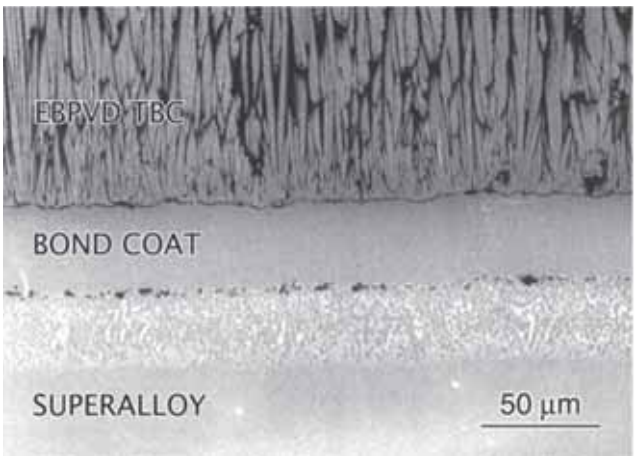


Figura 5-2 Recubrimiento de barrera térmica sobre una superaleación basada en níquel. (*Cortesía de los doctores F. S. Pettit y G. H. Meier, University of Pittsburgh*)

la figura 5-2, EBPVD significa deposición física del vapor por medio de un haz de electrones. El recubrimiento adherente es una aleación basada en platino o molibdeno que proporciona adhesión entre el RBT y el sustrato.

Fibras ópticas y componentes microelectrónicos

Las fibras ópticas fabricadas con sílice (SiO_2) se recubren con materiales poliméricos para prevenir la difusión de las moléculas de agua. Esto, a su vez, mejora las propiedades ópticas y mecánicas de las fibras.

Ejemplo 5-1 *Difusión del Ar/He y Cu/Ni*

Considere una caja que contiene una división impermeable que divide la caja en volúmenes iguales (figura 5-3). En un lado se introduce gas argón (Ar) puro; en el otro, gas helio (He) puro. Explique qué sucederá cuando se abra la división. ¿Qué sucederá si se reemplaza el lado con Ar con un monocristal de Cu y el lado con He con un monocristal de Ni?

SOLUCIÓN

Antes de que se retire la placa divisoria, un compartimiento no tiene argón y el otro no tiene helio (es decir, existe un gradiente de concentración del Ar y del He). Cuando se abre la división, los átomos de Ar se difundirán hacia el lado con He, y viceversa. Esta difusión continuará hasta que toda la caja tenga una concentración uniforme de ambos gases. También puede haber algún gradiente de las densidades que impulsen corrientes o flujos de convección. Si se toman al azar muestras de distintas regiones en la caja después de unas horas, se encontrará una concentración estadísticamente uniforme de Ar y He. Observe que los átomos de Ar y He continuarán moviéndose en la caja debido a sus energías térmicas; sin embargo, no habrá gradientes de concentración.

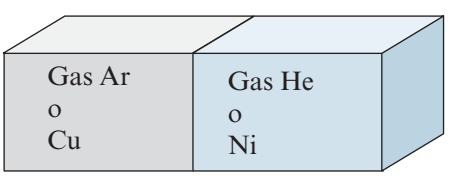


Figura 5-3 Ilustración de la difusión de Ar/He y Cu/Ni (ejemplo 5-1).

Si se retira la división hipotética entre los monocristales de Ni y Cu a temperatura ambiente, se encontrará que, de manera similar a la situación del Ar/He, los gradientes de concentración existen, pero la temperatura es tan baja que no se puede observar ninguna difusión significativa de los átomos de Cu en el monocristal de Ni y viceversa. Este es un ejemplo de una situación en la que existe un gradiente de concentración; sin embargo, debido a la baja temperatura la cinética de la difusión no es favorable. Sin duda, si se incrementa la temperatura (por decir a 600°C) y se espera un periodo considerable (por ejemplo, ~24 horas), se observará la difusión de los átomos de Cu en el monocristal de Ni y viceversa. Después de un tiempo muy largo, todo el sólido tendrá una concentración uniforme de átomos de Ni y Cu. El nuevo sólido que se forma consiste en átomos de Cu y Ni disueltos por completo entre sí y al material resultante se le nombra "solución sólida", un concepto que se estudiará con mayor detalle en el capítulo 10.

Este ejemplo también ilustra algo que se puede saber por intuición. La difusión de los átomos y moléculas ocurre más rápido en vidrios y líquidos que en los sólidos. Como se verá en el capítulo 9 y otros capítulos, la difusión tiene un efecto significativo sobre la evolución de la microestructura durante la solidificación de las aleaciones, el tratamiento térmico de los metales y aleaciones, y el procesamiento de materiales cerámicos.

5-2 Estabilidad de átomos e iones

En el capítulo 4 se demostró que los materiales tienen imperfecciones y que pueden introducirse de manera deliberada en ellos; sin embargo, en realidad estas imperfecciones, e incluso los átomos o iones ubicados en sus posiciones normales en las estructuras cristalinas, no son estables o están en reposo. Por el contrario, los átomos o iones poseen energía térmica y se mueven. Por ejemplo, un átomo puede moverse de una localización normal en la estructura cristalina para ocupar una vacancia cercana. También puede trasladarse de un sitio intersticial a otro. Los átomos o iones pueden saltar a través de un límite de grano y provocar que dicho límite se mueva.

La capacidad de los átomos e iones para difundirse aumenta a medida que la temperatura, o energía térmica que poseen, se incrementa. La velocidad del movimiento de los átomos o iones se relaciona con la temperatura o energía térmica por medio de la *ecuación de Arrhenius*:

$$\text{Velocidad} = c_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \tag{5-1}$$

donde c_0 es una contante, R la constante de los gases $\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \text{ u } 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)$, T la temperatura absoluta (K) y Q la **energía de activación** (cal/mol o J/mol) que se requiere para provocar que se mueva un mol de átomos o iones. Esta ecuación se deduce a partir de un análisis estadístico de la probabilidad de que los átomos tendrán la energía adicional Q necesaria para provocar el movimiento. La velocidad está relacionada con el número de átomos que se mueven.

Se puede reescribir esta ecuación aplicando los logaritmos naturales de ambos lados:

$$\ln(\text{velocidad}) = \ln(c_0) - \frac{Q}{RT} \tag{5-2}$$

Si se grafica el ln(velocidad) de alguna reacción en función de $1/T$ (figura 5-4), la pendiente de la recta será $-Q/R$ y, en consecuencia, puede calcularse Q. La constante c_0 corresponde a la intersección en $\ln(c_0)$ cuando $1/T$ es cero.

Svante August Arrhenius (1859-1927), químico sueco que ganó el premio Nobel de Química en 1903 por su investigación sobre la teoría electrolítica de la disociación, aplicó esta idea a las velocidades de las reacciones químicas en soluciones acuosas. Su idea básica de la energía de activación y las velocidades de las reacciones químicas como funciones de la temperatura se ha aplicado desde entonces a los procesos de velocidades de difusión y otros relacionados.

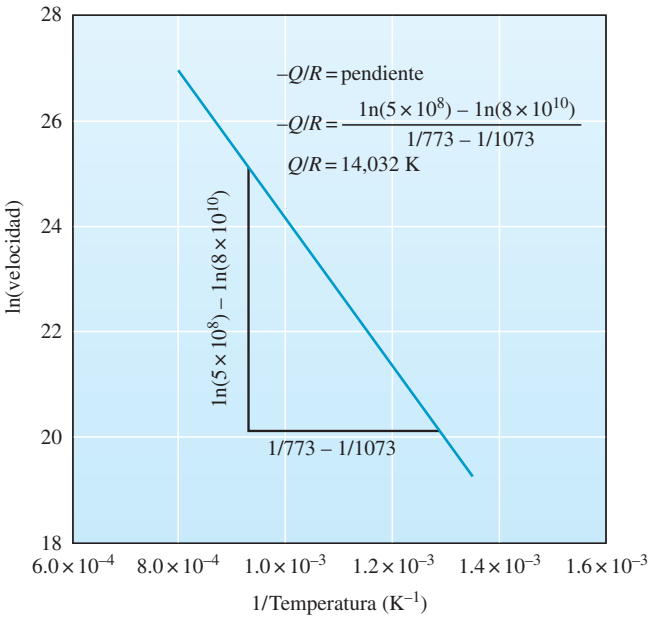


Figura 5-4 La gráfica de Arrhenius de ln(velocidad) en función de $1/T$ puede utilizarse para determinar la energía para activar una reacción. La información de esta figura se utiliza en el ejemplo 5-2.

Ejemplo 5-2 *Energía de activación de los átomos intersticiales*

Suponga que los átomos intersticiales se mueven de un sitio a otro a las velocidades de 5×10^8 saltos/s a 500°C y de 8×10^{10} saltos/s a 800°C. Calcule la energía de activación Q del proceso.

SOLUCIÓN

La figura 5-4 representa la información en la gráfica del ln(velocidad) en función de $1/T$; la pendiente de esta resta, como se calculó en la figura, da Q/R= 14,032 K, o $Q = 1.167 \times 10^5$ J/mol. Asimismo, se podrían escribir dos ecuaciones simultáneas:

$$\text{Velocidad} = c_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

$$5 \times 10^8 \frac{\text{saltos}}{\text{s}} = c_0 \exp\left[\frac{-Q}{\left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right)(500\ \text{K} + 273\ \text{K})}\right]$$

$$= c_0 \exp\,(-0.0001556\ Q)$$

$$8 \times 10^{10} \frac{\text{saltos}}{\text{s}} = c_0 \exp\left[\frac{-Q}{\left(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right)(800\ \text{K} + 273\ \text{K})}\right]$$

$$= c_0 \exp\,(-0.0001121\ Q)$$

Observe que las temperaturas se convirtieron a K. Dado que

$$c_0 = \frac{5 \times 10^8}{\exp\,(-0.0001556\ Q)}\left(\frac{\text{saltos}}{\text{s}}\right)$$

entonces

$$8 \times 10^{10} = \frac{(5 \times 10^8)\exp\,(-0.0001121\ Q)}{\exp\,(-0.0001556\ Q)}$$

$$160 = \exp\,[(0.0001556 - 0.0001121)Q] = \exp\,(0.0000435\ Q)$$

$$\ln(160) = 5.075 = 0.0435\ Q$$

$$Q = \frac{5.075}{0.0000435} = 1.167 \times 10^5\ \text{J/mol}$$

5-3 Mecanismos de difusión

Como se vio en el capítulo 4, en los materiales existen defectos conocidos como vacancias. El desorden que crean las vacancias (es decir, el aumento de entropía) ayuda a minimizar la energía libre y, por lo tanto, incrementa la estabilidad termodinámica de un material cristalino. En los materiales que contienen vacancias, los átomos se mueven o "saltan" de una posición de red a otra. Este proceso, conocido como **autodifusión**, puede detectarse utilizando trazadores radiactivos. Como ejemplo, suponga que se introduce un isótopo radiactivo de oro (Au^{198}) en la superficie del oro estándar (Au^{197}). Pasado un tiempo, los átomos radiactivos se moverán hacia el oro estándar. Después, los átomos radiactivos se distribuirán de manera uniforme a lo largo de toda la muestra de oro estándar. Aunque la autodifusión se lleva a cabo de manera continua en todos los materiales, su efecto sobre el comportamiento del material por lo general no es significativo.

Interdifusión

La difusión de átomos distintos también se lleva a cabo en los materiales (figura 5-5). Considere una hoja de níquel unida a una hoja de cobre. A altas temperaturas, los átomos de níquel se difunden de manera gradual en el cobre mientras que los de cobre migran al níquel. De nuevo, los átomos de níquel y de cobre se distribuirán de manera uniforme con el transcurso del tiempo. A la difusión de átomos distintos en direcciones diferentes se le conoce como **interdifusión**. Existen dos mecanismos importantes por medio los cuales los átomos o iones pueden difundirse (figura 5-6): difusión por vacancia y difusión intersticial.

Difusión por vacancia

Cuando se produce la autodifusión y la difusión que involucran átomos sustitucionales, un átomo deja su sitio de red para llenar una vacancia cercana (por lo tanto, crea una nueva vacancia en el sitio de red original). A medida que continúa la difusión, se tienen contraflujos de átomos y vacancias, a lo que se le llama **difusión por vacancia**. El número de vacancias, que aumenta a medida que se incrementa la temperatura, influye en la magnitud de la autodifusión y difusión de los átomos sustitucionales.

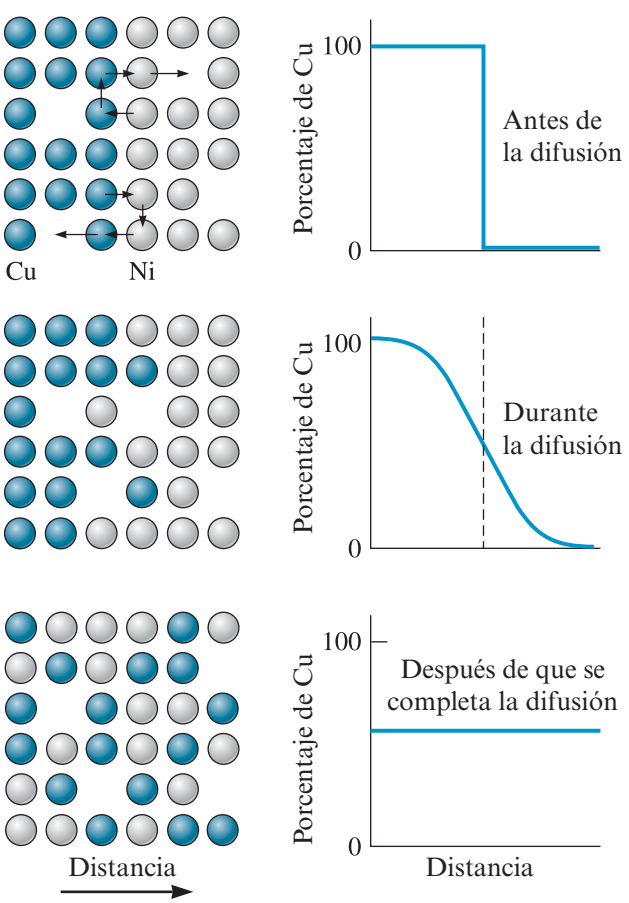
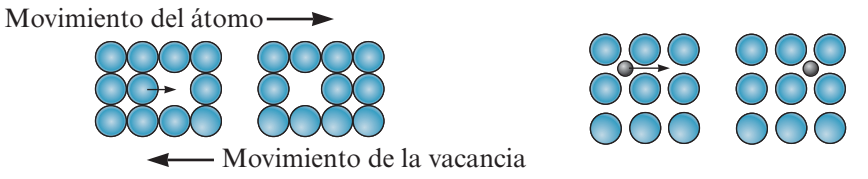


Figura 5-5 Difusión de átomos de cobre en níquel. Con el tiempo, los átomos de cobre se distribuyen de manera aleatoria a lo largo del níquel.



***a*)** Mecanismo de vacancias ***b*)** Mecanismo intersticial

Figura 5-6 Mecanismos de difusión en los materiales: *a*) difusión por vacancia o átomos sustitucionales y *b*) difusión intersticial.

Difusión intersticial Cuando en la estructura cristalina se encuentra un átomo o ion intersticial pequeño, el átomo o ion se mueve de un sitio intersticial a otro. No se requieren vacancias para que se concrete este mecanismo. En parte debido a que hay mucho más sitios intersticiales que vacancias, la **difusión intersticial** se lleva a cabo con mucha mayor facilidad que la difusión por vacancia. Los átomos intersticiales, relativamente más pequeños, se difunden más rápido. En el capítulo 3 se vio que la estructura de muchas cerámicas con enlazamiento iónico puede considerarse como compacta de aniones con cationes en los sitios intersticiales. En estos materiales, los cationes más pequeños con frecuencia se difunden más rápido que los aniones más grandes.

5-4 Energía de activación de la difusión

Mientras se difunden, los átomos deben abrirse camino a través de los átomos que los rodean para alcanzar su nuevo sitio. Para que esto suceda, debe aplicarse energía con el fin de permitir que el átomo se mueva a su nueva posición, como se muestra de manera esquemática en la difusión por vacancia e intersticial de la figura 5-7. Al principio, el átomo está en un lugar de baja energía relativamente estable. Para moverse a una nueva localización, debe superar una barrera de energía, que es la energía de activación Q. La energía térmica suministra a los átomos e iones la energía necesaria para superar esta barrera. Observe que, con frecuencia, se utiliza el símbolo Q para denotar las energías de activación de distintos procesos (velocidad a la que saltan los átomos, una reacción química, la energía necesaria para producir vacancias, etc.), y se debe tener cuidado de comprender el proceso o fenómeno específico al que se está aplicando el término general de energía de activación Q, ya que el valor de ésta depende del fenómeno específico.

Por lo general, se requiere menos energía para forzar un átomo intersticial a través de los átomos circundantes; en consecuencia, las energías de activación que se requieren para la difusión intersticial son menores que para la difusión por vacancia. En la tabla 5-1 se muestran los valores comunes de las energías de activación para la difusión de distintos átomos en diferentes materiales

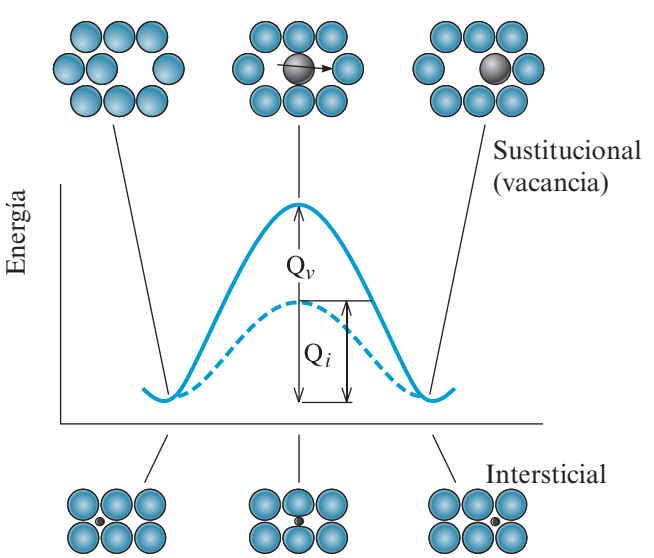


Figura 5-7 Se requiere de una energía de activación Q para forzar átomos entre sí durante la difusión. Por lo general, se requiere más energía en el caso de un átomo sustitucional que en el de un átomo intersticial.

Tabla 5-1 Datos de difusión de algunos materiales

Par de difusión	Q (kJ/mol)	D_0 (m^2/s) × 10^4
Difusión intersticial:		
C en hierro CCCa	137.7	0.23
C en hierro CCCu	87.45	0.011
N en hierro CCCa	144.7	0.0034
N en hierro CCCu	76.6	0.0047
H en hierro CCCa	43.1	0.0063
H en hierro CCCu	15.1	0.0012
Autodifusión (difusión por vacancia):		
Pb en Pb CCCa	108.4	1.27
Al en Al CCCa	134.7	0.10
Cu en Cu CCCa	206.3	0.36
Fe en Fe CCCa	279.1	0.65
Zn en Zn CH	91.2	0.1
Mg en Mg CH	134.7	1.0
Fe en Fe CCCu	246.4	4.1
W en W CCCu	600	1.88
Si en Si (covalente)	460.3	1800.0
C en C (covalente)	682.0	5.0
Difusión heterogénea (difusión por vacancia):		
Ni en Cu	242.3	2.3
Cu en Ni	257.3	0.65
Zn en Cu	183.7	0.78
Ni en hierro CCCa	267.8	4.1
Au en Ag	190.4	0.26
Ag en Au	168.2	0.072
Al en Cu	165.3	0.045
Al en Al_2O_3	477	28.0
O en Al_2O_3	636	1900.0
Mg en MgO	330.5	0.249
O en MgO	343.5	0.000043

Información a partir de varias fuentes, entre ellas, Adda, Y. y Philibert, J., La Diffusion dans les Solides, vol. 2, 1966.

anfitriones. Se utiliza el término **par de difusión** para indicar una combinación de un átomo de un elemento dado (por ejemplo, carbono) que se difunde en un material anfitrión (por ejemplo, Fe CCCu). Si la energía de activación es baja, la difusión será fácil. En la autodifusión, la energía de activación es igual a la energía necesaria para crear una vacancia y provocar el movimiento del átomo. La tabla 5-1 también muestra los valores de D_0, el término antes del exponente, y la constante c_0 de la ecuación 5-1, cuando el proceso de velocidad es la difusión. Más adelante se verá que D_0 es el coeficiente de difusión cuando $1/T = 0$.

5-5 Velocidad de difusión [primera ley de Fick]

Adolf Eugen Fick (1829-1901) fue el primer científico que realizó una descripción cuantitativa del proceso de difusión. Es interesante destacar que ¡Fick también fue el primero en experimentar con lentes de contacto en animales y el primero en implantar un lente de contacto en ojos humanos en 1887-1888!

La velocidad a la que los átomos, iones, partículas u otras especies se difunden en un material puede medirse por medio del **flujo** J. Aquí se trata principalmente con la difusión de iones o átomos. El flujo J se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo (figura 5-8). La **primera ley de Fick** explica el flujo neto de los átomos:

$$J = -D\frac{dc}{dx} \tag{5-3}$$

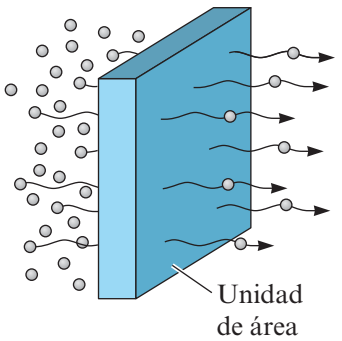


Figura 5-8 El flujo durante la difusión se define como el número de átomos que pasan a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo.

donde J es el flujo, D la **difusividad** o **coeficiente de difusión** $\left(\frac{m^2}{s}\right)$ y dc/dx el **gradiente de concentración** $\left(\frac{\text{átomos}}{m^3 \cdot m}\right)$. Con base en la situación, la concentración puede expresarse como porcentaje atómico (%at), porcentaje en peso (%pe), porcentaje molar (%mol), fracción atómica o fracción molar. Las unidades del gradiente de concentración y el flujo también cambiarán de manera acorde.

Varios factores afectan el flujo de átomos durante la difusión. Si se trata con difusión de iones, electrones, orificios, etc., las unidades de J, D y dc/dx reflejarán las especies apropiadas que se consideran. El signo negativo en la ecuación 5-3 indica que el flujo de la especie que se está difundiendo es de concentraciones mayores a menores, por lo que si el término dc/dx es negativo, J será positivo. La energía térmica asociada con los átomos, iones, etc., provoca el movimiento aleatorio de los átomos. A escala microscópica, la fuerza termodinámica impulsora de la difusión es el gradiente de concentración. Se crea un flujo neto o uno observable según la temperatura y el gradiente de concentración.

Gradiente de concentración

El gradiente de concentración muestra cómo varía la composición del material con la distancia: Δc es la diferencia entre la concentración sobre la distancia Δx (figura 5-9). Puede crearse un gradiente de concentración cuando dos materiales de distinta composición se ponen en contacto, cuando un gas o un líquido entran en contacto con un material sólido, cuando se producen estructuras sin equilibrio en un material debido al procesamiento y a partir de un anfitrión u otras fuentes.

El flujo a una temperatura específica es constante sólo si el gradiente de concentración también lo es, es decir, mientras las composiciones en cada lado del plano de la figura 5-8 permanezcan sin cambios. Sin embargo, en muchos casos prácticos estas composiciones varían a medida que los átomos se redistribuyen y por lo tanto el flujo también cambia. Con frecuencia, se encuentra que el flujo es inicialmente alto y que disminuye de manera gradual a medida que el gradiente de concentración es reducido por la difusión. Los ejemplos que siguen ilustran los cálculos del flujo y los

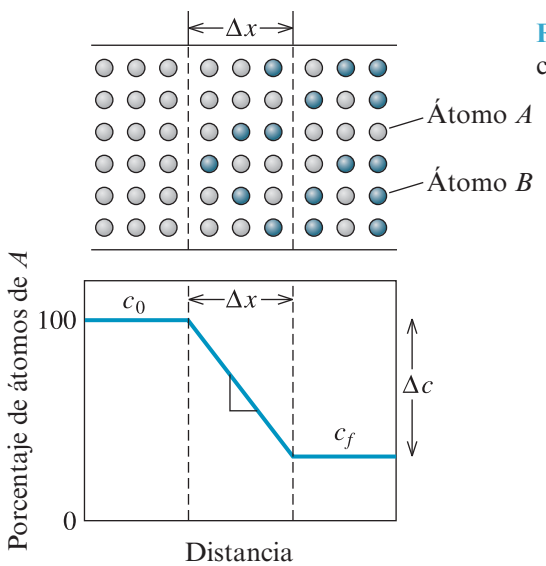


Figura 5-9 Ilustración del gradiente de concentración.

gradientes de concentración de la difusión de dopantes en semiconductores y cerámicas, pero sólo para el caso de un gradiente de concentración constante. Más adelante en este capítulo se considerará la difusión de estado inestable con la ayuda de la segunda ley de Fick.

Ejemplo 5-3 *Dopado de semiconductores*

Otra etapa en la fabricación de transistores, los cuales funcionan como conmutadores electrónicos en circuitos integrados, involucra la difusión de átomos impuros en un material semiconductor como el silicio. Suponga que una oblea de silicio de 1 mm de grosor, que contiene originalmente un átomo de fósforo por cada 10 millones de átomos de silicio, se trata de tal manera que llega a tener 400 átomos de fósforo en esa cantidad de átomos de Si en la superficie (figura 5-10). Calcule el gradiente de concentración a) en porcentaje atómico/cm y *b*) en $\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}$. El parámetro de red del silicio es de 0.54307 nm.

SOLUCIÓN

a) Primero se calculan las composiciones inicial y de la superficie en porcentaje atómico:

$$c_i = \frac{1 \text{ átomo de P}}{10^7 \text{ átomos}} \times 100 = 0.00001 \text{ \%at P}$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{10^7 \text{ átomos}} \times 100 = 0.004 \text{ \%at P}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0.00001 - 0.004 \text{ \%at P}}{1 \text{ mm}} \qquad 0.00399 \frac{\text{\%at P}}{\text{mm}}$$

b) Para determinar el gradiente en términos de $\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}$ se debe encontrar el volumen de la celda unitaria. La estructura cristalina del Si es la cúbica del diamante (CD). El parámetro de red es de 5.4307×10^{-10} m. Por lo tanto,

$$V_{\text{celda}} = (5.4307 \times 10^{-10} \text{ m})^3 = 1.6 \times 10^{-28} \frac{\text{m}^3}{\text{celda}}$$

El volumen ocupado por 10^7 átomos de Si, los cuales están arreglados en una estructura CD con 8 átomos/celda, es:

$$V = \left[\frac{10^7 \text{ átomos}}{8 \frac{\text{átomos}}{\text{celda}}}\right]\left[1.6 \times 10^{-28}\left(\frac{\text{mm}^3}{\text{celda}}\right)\right] = 2 \times 10^{-22} \text{ m}^3$$

Las composiciones en átomos/m^3 son:

$$c_i = \frac{1 \text{ átomo de P}}{2 \times 10^{-22} \text{ m}^3} = 0.005 \times 10^{24} \frac{\text{átomos de P}}{\text{m}^3}$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{2 \times 10^{-22} \text{ m}^3} = 2 \times 10^{24} \frac{\text{átomos de P}}{\text{m}^3}$$

Por lo tanto, el gradiente de composición es

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0.005 \times 10^{24} - 2 \times 10^{24} \frac{\text{átomos de P}}{\text{m}^3}}{1 \times 10^{-3} \text{ m}}$$
$$= -1.995 \times 10^{27} \frac{\text{átomos de P}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}$$

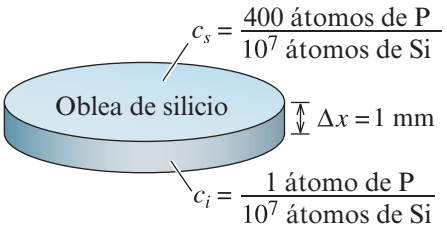


Figura 5-10 Oblea de silicio que muestra la variación de la concentración de los átomos de P (ejemplo 5-3).

Ejemplo 5-4 *Difusión del níquel en el óxido de magnesio (MgO)*

Se deposita una capa de 0.5 mm de óxido de magnesio (MgO) entre capas de níquel y tantalio para formar una barrera a la difusión que prevenga reacciones entre los dos metales (figura 5-11). A 1,400°C, los iones níquel se difunden a través de la cerámica de MgO al tantalio. Determine el número de iones níquel que pasan a través del MgO por segundo. A 1400°C, el coeficiente de difusión de los iones níquel en el MgO es de 9×10^{-16} m^2/s y el parámetro de red del níquel a 1400°C es de 0.36 nm.

SOLUCIÓN

La composición del níquel en la interfase Ni/MgO es de 100% Ni, o

$$c_{\text{Ni/MgO}} = \frac{4 \text{ átomos de Ni}}{(3.6 \times 10^{-10} \text{ m})^3} = 8.573 \times 10^{28} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{m}^3}$$

La composición del níquel en la interfase Ta/MgO es de 0% Ni. Por lo tanto, el gradiente de concentración es

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0 - 8.573 \times 10^{28} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{m}^3}}{0.5 \times 10^{-3} \text{ nm}} = -1.715 \times 10^{32} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}$$

El flujo de los átomos de níquel a través de la capa de MgO es

$$J = -D\frac{\Delta c}{\Delta x} = -(9 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s})\left(-1.715 \times 10^{32} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}\right)$$

$$J = 1.543 \times 10^{17} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

El número total de átomos de níquel que atraviesan la interfase de 20 mm × 20 mm por segundo es

$$\text{Total de átomos de Ni por segundo} = (J)(\text{Área}) = \left(1.543 \times 10^{17} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right)(20 \times 10^{-3} \text{ m})(20 \times 10^{-3} \text{ m})$$
$$= 6.17 \times 10^{13} \text{ átomos de Ni/s}$$

Aunque esta parece ser muy rápida, en un segundo el volumen de los átomos de níquel eliminados de la interfase de Ni/MgO es

$$\frac{6.17 \times 10^{13} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{s}}}{8.573 \times 10^{28} \frac{\text{átomos de Ni}}{\text{m}^3}} = 7.2 \times 10^{-19} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El grosor en que se reduce la capa de níquel cada segundo es

$$\frac{7.2 \times 10^{-19} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{(0.02 \text{ m})\ (0.02 \text{ m})} = 1.8 \times 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para un micrómetro (10^{-6}m) del níquel que se eliminará, el tratamiento requiere

$$\frac{10^{-6} \text{ m}}{1.8 \times 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 556{,}000 \text{ s} = 154 \text{ h}$$

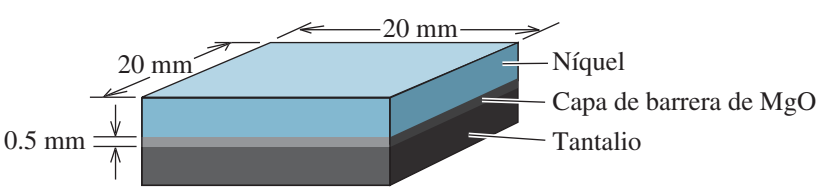


Figura 5-11 Par de difusión (ejemplo 5-4).

5-6 Factores que afectan la difusión

Temperatura y coeficiente de difusión

En gran medida, la cinética de la difusión depende de la temperatura. El coeficiente de difusión D se relaciona con la temperatura por medio de una ecuación de tipo Arrhenius,

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \tag{5-4}$$

donde Q es la energía de activación (en unidades de cal/mol o J/mol) de la difusión de la especie bajo consideración (por ejemplo, Al en Si), R la constante de los gases $\left(1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \text{ o } 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)$ y T la temperatura absoluta (K). D_0 es el término preexponencial, similar a c_0 en la ecuación 5-1.

D_0 es una constante de un sistema de difusión dado y es igual al valor del coeficiente de difusión a $1/T = 0$ o $T = \infty$. En la tabla 5-1 se dan los valores comunes de D_0, mientras que en la figura 5-12 se muestra la dependencia de D de la temperatura en los casos de algunos metales y cerámicas. Los materiales enlazados de manera covalente, como el carbono y el silicio (tabla 5-1) tienen energías de activación inusualmente altas, consistentes con la gran fuerza de sus enlaces atómicos. La figura 5-13 muestra los coeficientes de difusión de distintos dopantes en el silicio.

En los materiales iónicos, como algunas de las cerámicas de óxido, un ion que se difunde solo entra en un sitio que tiene la misma carga. Para alcanzar ese sitio, el ion debe forzarse físicamente a través de los iones adyacentes, pasar por una región de carga opuesta y moverse una distancia relativamente larga (figura 5-14). En consecuencia, las energías de activación son altas y las velocidades

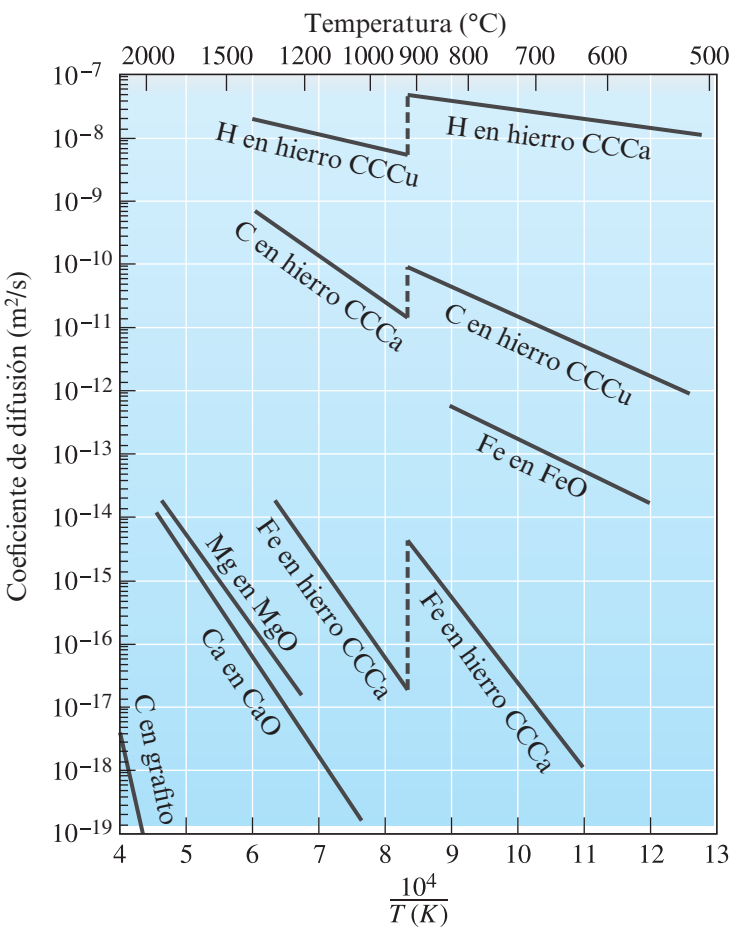


Figura 5-12 Coeficiente de difusión D como función del recíproco de la temperatura de algunos metales y cerámicas. En esta gráfica de Arrhenius, D representa la velocidad del proceso de difusión. Una pendiente pronunciada indica una alta energía de activación.

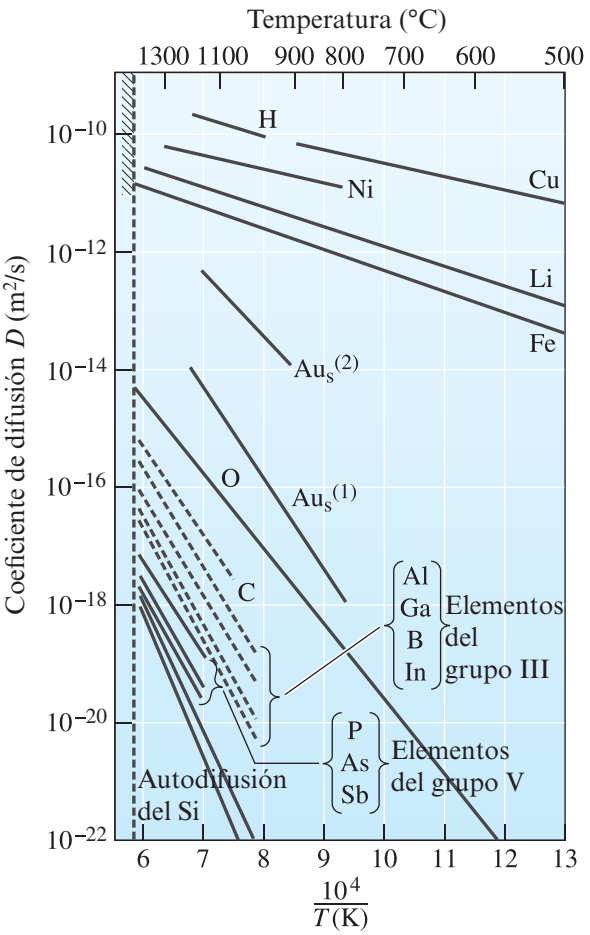


Figura 5-13 Coeficientes de difusión de distintos dopantes en el silicio. [Basado en *"Diffusion and Diffusion Induced Defects in Silicon", de U. Gösele. En R. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (eds.)*, Encyclopedia of Advanced Materials, vol. 1, 1994, Pergamon Press.]

de difusión son menores en el caso de los materiales iónicos que en el de los metales (figura 5-15). En muchas situaciones se aprovechan estas diferencias. Por ejemplo, en el procesamiento del silicio, se crea una capa delgada de sílice (SiO_2) en la parte superior de una oblea de silicio (capítulo 19). Después se abre una ventana para eliminar parte de la capa de sílice. La ventana permite la difusión selectiva de átomos dopantes como el fósforo y el boro, debido a que la capa de sílice es esencialmente impermeable a los átomos dopantes. La difusión más lenta en la mayoría de los óxidos y otras cerámicas también es una ventaja en aplicaciones en las que se requiere que los componentes soporten altas temperaturas.

Cuando la temperatura de un material aumenta, el coeficiente de difusión D se incrementa (según la ecuación 5-4) y, por lo tanto, también aumenta el flujo de átomos. A temperaturas más altas, la energía térmica que se suministra a los átomos que se están difundiendo permite que éstos superen la barrera de la energía de activación y se muevan con mayor facilidad a nuevos sitios. A temperaturas bajas, con frecuencia debajo de casi 0.4 veces la temperatura de fusión absoluta del material, la difusión es muy lenta y puede no ser significativa. Por esta razón, el tratamiento térmico de los metales y el procesamiento de las cerámicas se realizan a altas temperaturas, en cuyo caso los átomos se mueven con rapidez para completar las reacciones o para alcanzar las condiciones de equilibrio. Dado que se requiere menos energía térmica para superar la barrera de la energía de activación

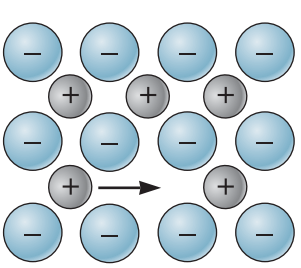


Figura 5-14 Difusión en compuestos iónicos. Los aniones sólo pueden entrar en otros sitios de aniones. Los cationes más pequeños tienden a difundirse más rápido.

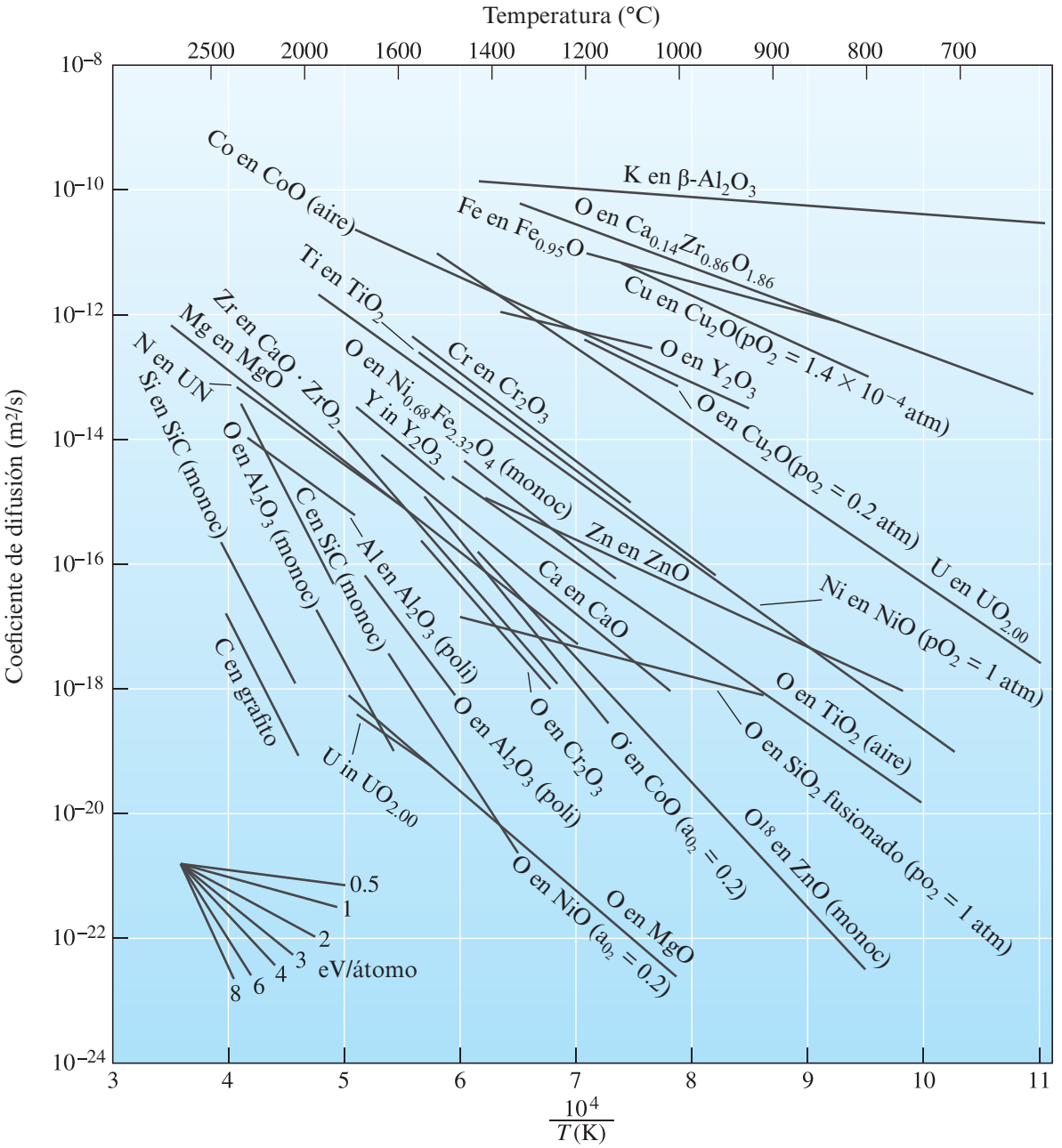


Figura 5-15 Coeficientes de difusión de iones en distintos óxidos. (*Basado en* Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering, *de Y. M. Chiang, D. Birnie y W. D. Kingery, John Wiley & Sons, Inc., 1997*.)

menor, una pequeña energía de activación Q aumenta el coeficiente de difusión y el flujo. El siguiente ejemplo ilustra cómo la primera ley de Fick y los conceptos relacionados con la dependencia de la temperatura de D pueden aplicarse al diseño de una membrana de hierro.

Ejemplo 5-5 *Diseño de una membrana de hierro*

Un cilindro impermeable de 30 mm de diámetro y 100 mm de largo contiene un gas que incluye 5×10^{25} átomos de N por m^3 y 5×10^{25} átomos de H por m^3 en un lado de una membrana de hierro (figura 5-16). Se introduce gas de manera continua al tubo para asegurar una concentración constante de nitrógeno e hidrógeno. El gas del otro lado de la membrana incluye una constante de

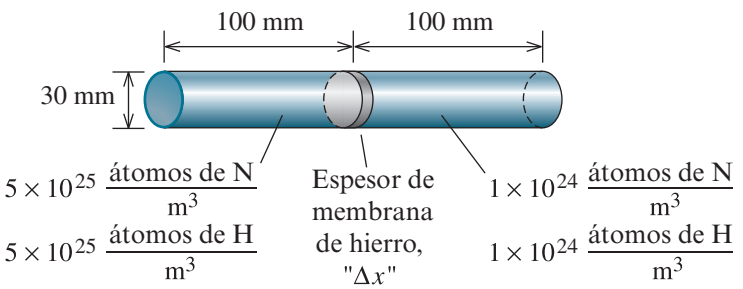


Figura 5-16 Diseño de una membrana de hierro (ejemplo 5-5).

1×10^{24} átomos de N por m^3 y 1×10^{24} átomos de H por m^3. El sistema opera a 700°C, temperatura a la que el hierro tiene la estructura CCCu. Diseñe una membrana de hierro que no permita que se pierda cada hora más de 1% de nitrógeno a través de la membrana, pero que permita que 90% del hidrógeno pase a través de la membrana por hora.

SOLUCIÓN

El número total de átomos de nitrógeno en el contenedor es

$$(5 \times 10^{25} \text{ átomos de N/m}^3)(\pi/4)(0.03 \text{ m})^2(0.1 \text{ m}) = 3.524 \times 10^{21} \text{ átomos de N}$$

El número máximo de átomos que se perderán es de 1% de este total o

$$\begin{aligned}\text{Átomos de N que se perderán por h} &= (0.01)(3.534 \times 10^{21}) = 3.534 \times 10^{19} \text{ átomos de N/h} \\ \text{Átomos de N que se perderán por s} &= (3.534\ 10^{19} \text{ átomos de N/h})(3{,}600 \text{ s/h}) \\ &= 9.817 \times 10^{15} \text{ átomos de N/s}\end{aligned}$$

El flujo es entonces

$$J = \frac{9.817 \times 10^{15} \text{ átomos de N/s}}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(0.03 \text{ m})^2}$$

$$= 1.389 \times 10^{19} \frac{\text{átomos de N}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Utilizando la ecuación 5-4 y los valores de la tabla 5-1, el coeficiente de difusión del nitrógeno en el hierro CCCu a 700°C = 973 K es

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

$$D_N = 4.7 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-76567.2 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}}{\left(8.3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(973 \text{ K})}\right]$$

$$= \left(4.7 \times 10^{-7} \tfrac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)(7.748 \times 10^{-5}) = 3.642 \times 10^{-11} \tfrac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

A partir de la ecuación 5-3:

$$J = -D\left(\frac{\Delta c}{\Delta x}\right) = 1.389 \times 10^{19} \frac{\text{átomos de N}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\Delta x = -\frac{D\Delta c}{J} = \frac{(-3.642 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s})\left(1 \times 10^{24} - 5 \times 10^{25} \frac{\text{átomos de N}}{\text{m}^3}\right)}{1.389 \times 10^{19} \frac{\text{átomos de N}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$$

$$\Delta x = 0.13 \text{ mm} = \text{grosor mínimo de la membrana}$$

De manera similar, el grosor máximo de la membrana que permitirá que pase 90% del hidrógeno puede calcularse como

$$\text{Átomos de H que se perderán por h} = (0.90)(3.534 \times 10^{21}) = 3.180 \times 10^{21} \text{ átomos de H/h}$$

$$\text{Átomos de H que se perderán por s} = 8.836 \times 10^{17} \text{ átomos de H/s}$$

$$J = 1.250 \times 10^{21} \frac{\text{átomos de H}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

A partir de la ecuación 5-4 y la tabla 5-1,

$$D_{\text{H}} = 1.2 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-15062.4 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{\left(8.3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(973\ K)}\right] = 1.864 \times 10^{-8}\ \text{m}^2/\text{s}$$

Dado que

$$\Delta x = -\frac{D\Delta c}{J}$$

$$\Delta x = \frac{\left(-1.864 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)\left(1 \times 10^{24} - 5 \times 10^{25} \frac{\text{átomos de H}}{\text{m}^3}\right)}{1.250 \times 10^{21} \frac{\text{átomos de H}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}$$

$$= 0.73 \text{ mm} = \text{grosor máximo}$$

Una membrana de hierro con un grosor de entre 0.13 y 0.73 m será satisfactoria.

Tipos de difusión

Cuando se produce **difusión por volumen**, los átomos se mueven a través del cristal de un sitio regular o intersticial a otro. Debido a los átomos circundantes, la energía de activación es grande mientras que la velocidad de la difusión es relativamente lenta.

Los átomos también pueden difundirse a lo largo de los límites, interfaces y superficies del material. Los átomos se difunden con facilidad por **difusión por límite de grano** en razón de que el empaquetamiento atómico es desordenado y menos denso en los límites de grano. Debido a que los átomos pueden forzarse más fácilmente a través del límite de grano, la energía de activación es baja (tabla 5-2). La **difusión por superficie** es aún más fácil, dado que los átomos que se difunden en la superficie padecen una restricción aún menor.

Tiempo

La difusión requiere tiempo. Las unidades del flujo son $\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$. Si debe difundirse un gran número de átomos para producir una estructura uniforme, se requieren tiempos largos, aun a altas temperaturas. Los tiempos necesarios para los tratamientos térmicos pueden reducirse si se emplean temperaturas mayores o se minimizan las **distancias para la difusión** (relacionadas con Δx).

Si se previene la difusión, se obtienen algunas estructuras y propiedades bastante notables. A altas temperaturas los aceros se templan rápidamente, lo cual evita que la difusión forme estructuras desequilibradas a la vez que proporciona la base para tratamientos térmicos sofisticados. De manera similar, en la formación de vidrios metálicos, los metales líquidos se tienen que templar a una velocidad de enfriamiento muy alta. Este proceso es necesario para evitar la difusión de átomos mediante

Tabla 5-2 Efecto del tipo de difusión del torio en tungsteno y de la autodifusión en la plata

Tipo de difusión	Coeficiente de difusión (D)			
	Torio en tungsteno		Plata en plata	
	D_0 (m^2/s) $\times 10^4$	Q (MJ/mol)	D_0 (m^2/s) $\times 10^4$	Q (MJ/mol)
Por superficie	0.47	277.8	0.068	37.2
Por límite de grano	0.74	376.6	0.24	95.2
Por volumen	1.00	502.1	0.99	191.2

la reducción de su energía térmica a la vez que se los estimula a ensamblarse en arreglos amorfos sin equilibrio. Por otro lado, las fusiones de vidrios de silicato son viscosas y la difusión de los iones a través de ellos es lenta. Como resultado, no se tienen que enfriar estas fusiones de manera muy rápida para lograr una estructura amorfa. Existe el mito de que muchos edificios antiguos contienen cristales de ventanas que son más gruesos en la parte inferior que en la parte superior, debido a que el vidrio ha fluido hacia abajo con el transcurso de los años. Con base en la cinética de la difusión, puede mostrarse que incluso varios cientos o miles de años no serán suficientes para provocar tal flujo de los vidrios a temperatura casi ambiente. En el siguiente ejemplo se examinan los diferentes mecanismos de los cuales se vale la difusión.

Ejemplo 5-6 *Par de difusión tungsteno torio*

Considere un par de difusión colocado entre tungsteno puro y una aleación de tungsteno que contiene 1% de átomos de torio. Después de varios minutos de exposición a 2,000°C, se establece una zona de transición de 0.1 mm de grosor. ¿Cuál es el flujo de los átomos de torio en ese tiempo si la difusión se debe a *a*) difusión por volumen, *b*) difusión por límite de grano y *c*) difusión por superficie? (Vea la tabla 5-2.)

SOLUCIÓN

El parámetro de red del tungsteno CCCu es de 3.165 Å. Por lo tanto, el número de átomos/cm^3 de tungsteno es

$$\frac{\text{átomos de W}}{\text{m}^3} = \frac{2 \text{ átomos/celda}}{(3.165 \times 10^{-10} \text{ m})^3/\text{celda}} = 6.3 \times 10^{28}$$

En la aleación de tungsteno con 1% de átomos de torio, el número de átomos de torio es

$$c_{\text{Th}} = (0.01)(6.3 \times 10^{28}) = 6.3 \times 10^{26} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^3}$$

En el tungsteno puro, el número de átomos de torio es cero. Por lo tanto, el gradiente de concentración es

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0 - 6.3 \times 10^{26} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^3}}{0.1 \times 10^{-3}} = -6.3 \times 10^{30} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}$$

a) Difusión por volumen

$$D = 1 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-5.021 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{\left(8.3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(2273 \text{ K})}\right] = 2.89 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$J = -D\frac{\Delta c}{\Delta x} = -\left(2.89 \times 10^{-16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)\left(-6.3 \times 10^{30} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}\right)$$
$$= 1.82 \times 10^{15} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

b) Difusión por límite de grano

$$D = 7.4 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-3.766 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{\left(8.3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(2273 \text{ K})}\right] = 1.64 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$J = -\left(1.64 \times 10^{-13} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)\left(-6.3 \times 10^{30} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}\right) = 1.03 \times 10^{18} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

c) Difusión por superficie

$$D = 4.7 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \exp\left[\frac{-2.778 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{\left(8.3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)(2273 \text{ K})}\right] = 1.94 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$J = -\left(1.94 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)\left(-6.3 \times 10^{30} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^3 \cdot \text{m}}\right) = 1.22 \times 10^{20} \frac{\text{átomos de Th}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

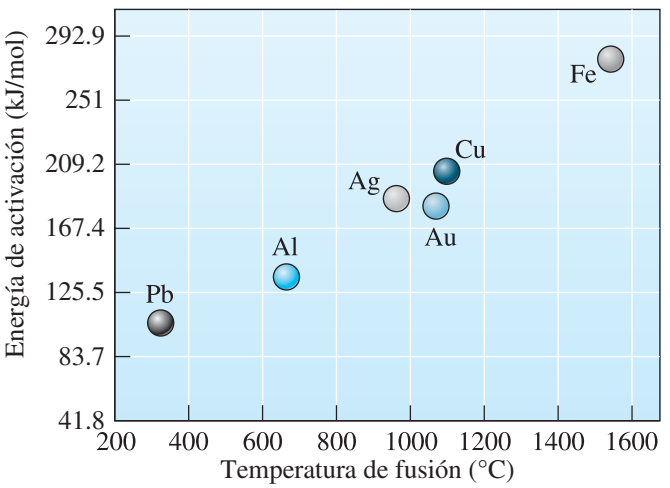


Figura 5-17 La energía de activación de la autodifusión aumenta a medida que se incrementa el punto de fusión del metal.

Dependencia del enlace y de la estructura cristalina

Varios factores influyen en la energía para activar la difusión y, por lo tanto, en la velocidad de ésta. La difusión intersticial, con una energía de activación baja, por lo general se lleva a cabo mucho más rápido que la de por vacancia, o difusión sustitucional. Por su parte, normalmente las energías de activación son menores en el caso de los átomos que se difunden a través de estructuras cristalinas abiertas que las que lo hacen a través de estructuras cristalinas compactas. Debido a que la energía de activación depende de la fuerza del enlace atómico, es mayor en el caso de la difusión de átomos en materiales con una alta temperatura de fusión (figura 5-17).

También, debido a su menor tamaño, los cationes (con una carga positiva) con frecuencia tienen coeficientes de difusión mayores que los de los aniones (con una carga negativa). Por ejemplo, en el cloruro de sodio la energía de activación de la difusión de los iones cloruro (Cl^-) casi duplica la que se necesita para difundir los iones sodio (Na^+).

La difusión de los iones también permite la transferencia de carga eléctrica; de hecho, la conductividad eléctrica de los materiales cerámicos enlazados iónicamente se relaciona con la temperatura por medio de la ecuación de Arrhenius. A medida que la temperatura aumenta, los iones se difunden con mayor rapidez, la carga eléctrica se transfiere más rápido y se incrementa la conductividad eléctrica. Como ya se mencionó, algunos materiales cerámicos son buenos conductores de electricidad.

Dependencia de la concentración de las especies que se están difundiendo y de la composición de la matriz

El coeficiente de difusión (D) no sólo depende de la temperatura, como lo señala la ecuación 5-4, sino también de la concentración de las especies que se están difundiendo y de la composición de la matriz. Usted debe consultar textos de nivel más alto para obtener información adicional.

5-7 Permeabilidad de los polímeros

Cuando se manejan polímeros, se trata principalmente con la difusión de átomos o moléculas pequeñas entre las cadenas largas de polímeros. Como ingenieros, con frecuencia se cita la **permeabilidad** de los polímeros y otros materiales, en lugar de los coeficientes de difusión. Los polímeros que contienen un grupo polar (por ejemplo, el alcohol etileno vinílico) son más permeables por el vapor de agua que por el gas oxígeno. Por otro lado, el polietileno es mucho más permeable por el oxígeno que por el vapor de agua. En general, mientras más compacta sea la estructura de los polímeros, menor será la permeabilidad. Por ejemplo, el polietileno de baja densidad tiene una permeabilidad mayor que el polietileno de alta densidad. Los polímeros que se emplean para empaquetar alimentos y otras aplicaciones deben tener las propiedades de barrera apropiadas. Por ejemplo, por lo general se utilizan películas de polímero para envolver alimentos para luego poder almacenarlos. Si el aire

se difunde a través de la película, el alimento puede echarse a perder. De modo similar, debe tenerse cuidado cuando se almacenan polvos cerámicos o metálicos que sean sensibles al vapor de agua atmosférico, al nitrógeno, al oxígeno o al dióxido de carbono. Por ejemplo, los polvos de óxido de zinc que se usan en hules, pinturas y cerámicas deben almacenarse en bolsas de polietileno para evitar reacciones con el vapor de agua atmosférico.

La difusión de algunas moléculas en un polímero puede provocar problemas de expansión. Por ejemplo, en las aplicaciones para autos se usan polímeros para fabricar anillos herméticos que puedan absorber cantidades considerables de aceite, lo que provoca que se expandan. Por otro lado, se requiere la difusión para permitir que los tintes entren de manera uniforme en muchos de los tejidos poliméricos sintéticos. La difusión selectiva a través de membranas poliméricas se usa para desalinizar el agua, cuyas moléculas pasan a través de la membrana polimérica y atrapan los iones de la sal.

En cada uno de estos ejemplos, los átomos, iones o moléculas en proceso de difusión penetran entre las cadenas de polímero en lugar de moverse de un lugar a otro dentro de la estructura de la cadena. La difusión será más rápida a través de esta estructura cuando la especie que se está difundiendo sea más pequeña o cuando se presenten vacíos mayores entre las cadenas. Además, la difusión a través de polímeros cristalinos es más lenta que a través de polímeros amorfos, los cuales no tienen orden de largo alcance y, en consecuencia, tienen una densidad menor.

5-8 Perfil de composición [segunda ley de Fick]

La **segunda ley de Fick**, que describe la difusión dinámica de átomos, o de estado no estacionario, se representa mediante la ecuación diferencial

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial c}{\partial x}\right) \tag{5-5}$$

Si se supone que el coeficiente de difusión D no es una función de la localización x ni de la concentración (c) de la especie que se está difundiendo, se puede escribir una versión simplificada de esta ley de Fick como

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right) \tag{5-6}$$

La solución de esta ecuación depende de las condiciones limitantes de una situación en particular. Una solución es

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \tag{5-7}$$

donde c_s es una concentración constante de los átomos que se están difundiendo en la superficie del material, c_0 la concentración uniforme inicial de los átomos que se están difundiendo en el material y c_x la concentración del átomo que se está difundiendo en la localización x debajo de la superficie después de un tiempo t. En la figura 5-18 se ilustran estas concentraciones. Básicamente, en estas ecuaciones se ha supuesto un modelo unidimensional (es decir, se supone que los átomos u otras especies que se están difundiendo sólo se mueven en la dirección x). La función "erf" es la función

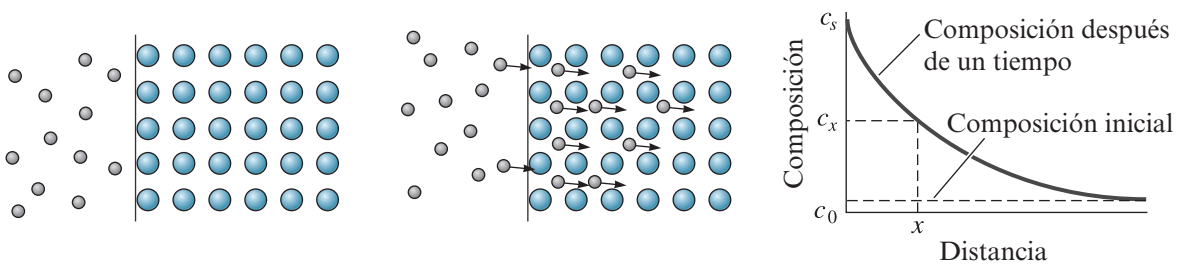


Figura 5-18 Difusión de átomos en la superficie de un material que ilustra el uso de la segunda ley de Fick.

Tabla 5-3 Valores de la función de error de la segunda ley de Fick

Argumento de la función de error $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	Valor de la función de error erf $\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7969
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953

Observe que los valores de la función de error están disponibles en distinto software para computadora personal.

de error y puede evaluarse a partir de la tabla 5-3 o de la figura 5-19. Observe que la mayoría de los programas de cálculo y otro software como Excel[MR] y MATLAB® proporcionan los valores de la función de error.

La definición matemática de la función de error es la siguiente:

$$\text{erf}\,(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2)dy \tag{5-8}$$

En la ecuación 5-8 se conoce a y como el argumento de la función de error. También se define una función de error complementaria como

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) \tag{5-9}$$

Esta función se utiliza en ciertas formas de solución de la segunda ley de Fick.

Como ya se mencionó, con base en las condiciones limitantes, distintas soluciones (es decir, diferentes ecuaciones) describen las soluciones de la segunda ley de Fick, las cuales permiten calcular la concentración de una especie que se está difundiendo como una función del tiempo (t) y de la localización (x). La ecuación 5-7 es *una solución posible* de la segunda ley de Fick que describe la variación de la concentración de distintas especies cerca de la superficie del material como una función

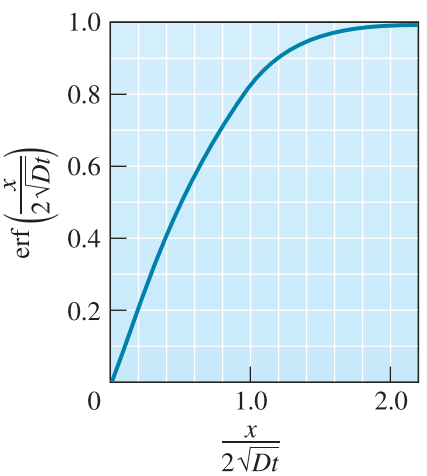


Figura 5-19 Gráfica que muestra el argumento y el valor de la función de error que se encuentran en la segunda ley de Fick.

del tiempo y la distancia, siempre que el coeficiente de difusión D permanezca constante y que las concentraciones de los átomos que se están difundiendo en la superficie (c_s) y a una distancia grande (x) dentro del material (c_0) permanezcan invariantes. La segunda ley de Fick también puede ayudar en el diseño de una variedad de técnicas de procesamiento de materiales, entre ellas la **carburización,** como se describe en los siguientes ejemplos.

Ejemplo 5-7 *Diseño de un tratamiento de carburización*

La superficie de un engrane de acero con 0.1% de C se tiene que endurecer por carburización. Cuando se recurre a la carburización gaseosa, los engranes de acero se colocan en una atmósfera que provee 1.2% de C en la superficie del acero a una temperatura alta (figura 5-1). El carbono se difunde de la superficie hacia el interior del acero. Para obtener las propiedades óptimas, el acero debe contener 0.45% de C a una profundidad de 2 mm debajo de la superficie. Diseñe un tratamiento térmico de carburización que produzca estas propiedades óptimas. Suponga que la temperatura es lo suficientemente alta (por lo menos de 900°C) y que el hierro tiene la estructura CCCa.

SOLUCIÓN

Dado que las condiciones limitantes para las cuales se dedujo la ecuación 5-7 se suponen válidas, se puede utilizar esta ecuación:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Se sabe que $c_s = 1.2\%$ de C, $c_0 = 0.1\%$ de C, $c_x = 0.45\%$ de C y $x = 2$ mm. A partir de la segunda ley de Fick:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \frac{1.2\%\text{ C} - 0.45\%\text{ C}}{1.2\%\text{ C} - 0.1\%\text{ C}} = 0.68 = \text{erf}\left(\frac{2 \times 10^{-3}\text{ m}}{2\sqrt{Dt}}\right) = \text{erf}\left(\frac{1 \times 10^{-3}\text{ m}}{\sqrt{Dt}}\right)$$

A partir de la tabla 5-3, se encuentra que:

$$\frac{1 \times 10^{-3}\text{ mm}}{\sqrt{Dt}} = 0.71 \text{ o } Dt = \left(\frac{0.1}{0.71}\right)^2 = 1.98 \times 10^{-6}\text{ m}^2$$

Cualquier combinación de D y t con un producto de 1.98 10^{-6}m^2 funcionará. En el caso de la difusión de carbono en hierro CCCa, el coeficiente de difusión se relaciona con la temperatura por medio de la ecuación 5-4:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

A partir de la tabla 5-1:

$$D = 2.3 \times 10^{-5} \exp\left[\frac{-1.376 \times 10^5\text{ J/mol}}{\left(8.3145\ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}\right)T}\right] = 2.3 \times 10^{-5} \exp\left(\frac{-16{,}558}{T}\right)$$

Por lo tanto, la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico se relacionan por medio de

$$t = \frac{1.98 \times 10^{-6}\text{ m}^2}{D} = \frac{1.98 \times 10^{-6}\text{ m}^2}{2.3 \times 10^{-5} \exp(-16{,}558/T)} = \frac{0.0861}{\exp(-16{,}558/T)}$$

Algunas combinaciones típicas de temperaturas y tiempos son:

Si $T = 900$°C = 1,173 K, entonces t =116,273 s = 32.3 h
Si $T = 1000$°C = 1,273 K, entonces t = 38,362 s =10.7 h
Si $T = 1100$°C = 1,373 K, entonces t = 14,876 s = 4.13 h
Si $T = 1200$°C = 1,473 K, entonces t = 6,560 s = 1.82 h

La combinación exacta de temperatura y tiempo depende de la temperatura máxima que pueda alcanzar el horno para el tratamiento térmico, de la velocidad a la que deben producirse las par-

tes y de la economía de las disyuntivas entre las altas temperaturas en comparación con tiempos mayores. Otro factor que se debe considerar son los cambios en la microestructura que ocurren en el resto del material. Por ejemplo, mientras el carbono se difunde en la superficie, el resto de la microestructura puede comenzar a experimentar un crecimiento del grano u otros cambios.

El ejemplo 5-8 muestra que una de las consecuencias de la segunda ley de Fick es que puede obtenerse el mismo perfil de concentración en distintas condiciones de procesamiento, siempre y cuando el término Dt sea constante. Esto permite determinar el efecto de la temperatura en el tiempo que se requiere para que se complete un tratamiento térmico en particular.

Ejemplo 5-8 *Diseño de un tratamiento térmico más económico*

Se requieren 10 h para carburar con éxito un lote de 500 engranajes de acero a 900°C, cuyo hierro tiene la estructura CCCa. Se sabe que cuesta 1,000 dólares por hora operar el horno para la carburización a 900°C y 1,500 dólares por hora para operarlo a 1,000°C. ¿Es económico incrementar la temperatura de la carburización a 1,000°C? ¿Cuáles otros factores deben considerarse?

SOLUCIÓN

De nuevo, se supone que se puede utilizar la solución de la segunda ley de Fick dada por medio de la ecuación 5-7:

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Las temperaturas de interés son 900°C = 1173 K y 1000°C = 1273 K. Para lograr el mismo tratamiento de carburización a 1000°C que a 900°C:

$$D_{1273}t_{1273} = D_{1173}t_{1173}$$

Para que el carbono se difunda en el hierro CCCa, la energía de activación debe ser de 1.376×10^5 J/mol. Dado que se está tratando con razones de tiempos, no importa si se sustituye el tiempo en horas o segundos. Sin embargo, siempre es una buena idea utilizar unidades que se cancelen. Por lo tanto, el tiempo se mostrará en segundos. Observe que la temperatura debe convertirse en Kelvin.

$$\begin{aligned}
D_{1273}t_{1273} &= D_{1173}t_{1173} \\
D &= D_0 \exp(-Q/RT) \\
t_{1273} &= \frac{D_{1173}t_{1173}}{D_{1273}} \\
&= \frac{D_0 \exp\left[-\dfrac{1.376 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{\left(8.3145 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right)(1173\ \text{K})}\right](10\ \text{hr})(3600\ \text{s/hr})}{D_0 \exp\left[-\dfrac{1.376 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{\left(8.3145 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right)(1273\ \text{K})}\right]} \\
t_{1273} &= \frac{\exp(-14.1156)(10)(3600)}{\exp(-13.0068)} \\
&= 11{,}878\ \text{s} \\
t_{1273} &= 3.299\ \text{h} = 3\ \text{h y}\ 18\ \text{min}
\end{aligned}$$

Observe que no se necesitó el valor del término preexponencial D_0, dado que se canceló.

A 900°C, el costo por parte es de (\$1,000/h)(10 h)/500 partes = \$20/parte. A 1,000°C, el costo por parte es de (\$1,500/h)(3.299 h)/500 partes = \$9.90/parte.

Si se considera sólo el costo de operación del horno, el incremento de la temperatura reduce el costo del tratamiento térmico de los engranajes e incrementa la velocidad de producción. Otro factor que se debe considerar es si el tratamiento térmico a 1000°C puede provocar algún cambio microestructural o de otro tipo. Por ejemplo, ¿el incremento de temperatura puede provocar que los granos crecieran de forma significativa? Si este es el caso, se debilitará todo el material. ¿Cómo afecta el incremento de la temperatura la vida de otro equipo como el mismo horno y cualquier accesorio? ¿Cuánto tiempo se debe emplear para el enfriamiento? ¿El enfriamiento a partir de una temperatura mayor provocaría esfuerzos residuales? ¿El producto seguirá satisfaciendo las demás especificaciones? Deben considerarse estas y otras preguntas. El asunto es que, como ingenieros, se necesita asegurar que la solución propuesta no sea sólo técnicamente adecuada y económicamente razonable, sino que debe integrarse y tener sentido para el sistema como un todo. Una buena solución con frecuencia es simple, resuelve problemas para el sistema y no genera nuevos problemas.

Ejemplo 5-9 *Fabricación de un dispositivo de silicio*

Ciertos dispositivos, como los transistores, se fabrican dopando semiconductores. El coeficiente de difusión del fósforo en Si es $D = 6.5 \times 10^{-17}$ m^2/s a una temperatura de 1,100°C. Suponga que la fuente proporciona una concentración superficial de 10^{29} átomos/m^3 y que el tiempo de difusión es de una hora. Suponga que la oblea de silicio inicialmente no contiene P.
Calcule la profundidad a la que la concentración del P será de 10^{24} átomos/m^3. Enuncie cualquier supuesto que haya realizado para resolver este problema.

SOLUCIÓN

Se supone que se puede utilizar una de los soluciones de la segunda ley de Fick (es decir, la ecuación 5-7):

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Se utilizarán concentraciones en átomos/cm^3, tiempo en segundos y D en m^2/s. Observe que el lado izquierdo es adimensional. Por lo tanto, siempre que se utilicen concentraciones en las mismas unidades para c_s, c_x y c_0, no importa qué unidades sean.

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \frac{10^{26}\,\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3} - 10^{24}\,\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3}}{10^{26}\,\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3} - 0\,\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3}} = 0.99$$

$$= \text{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\left(6.5 \times 10^{-17}\,\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)(3600\text{ s})}}\right]$$

$$= \text{erf}\left(\frac{x}{9.67 \times 10^{-7}}\right)$$

A partir de los valores de la función de error que se incluyen en la tabla 5-3 (o a partir de su calculadora/computadora), si erf(z) = 0.99, $z = 1.82$; por lo tanto,

$$1.82 = \frac{x}{9.67 \times 10^{-7}}$$

o

$$x = 1.76 \times 10^{-6}\text{ m}$$

o

$$x = (1.76 \times 10^{-6}\text{ m})$$

$$x = 1.76\ \mu\text{m}$$

Observe que se ha expresado la respuesta final en micrómetros dado que esta es la escala de longitud apropiada para esta aplicación. Los supuestos principales que se realizaron son 1) que el valor de D no cambia mientras se incorpora el fósforo en la oblea de silicio y 2) que la difusión de P sólo es una dimensión (es decir, se pasa por alto cualquier difusión lateral).

Limitaciones para aplicar la solución de la función de error que presenta la ecuación 5-7

Observe que en la ecuación que describe la segunda ley de Fick (ecuación 5-7):

a) Se supone que D es independiente de la concentración de la especie que se está difundiendo;

b) la concentración en la superficie de la especie que se está difundiendo (c_s) siempre es constante.

Existen situaciones en las que estas condiciones pueden no cumplirse, por lo que la evolución del perfil de concentración no se puede pronosticar por medio de la solución de la función de error que se presenta en la ecuación 5-7. Si las condiciones limitantes son distintas de las supuestas, deben utilizarse soluciones diferentes de la segunda ley de Fick.

5-9 Difusión y procesamiento de materiales

En la sección 5-1 se explicaron de manera breve aplicaciones de la difusión en el procesamiento de materiales. Numerosos ejemplos importantes relacionados con la solidificación, las transformaciones de fases, los tratamientos térmicos, etc., se explicarán en capítulos posteriores. En esta sección se presenta más información para realzar la importancia de la difusión en el procesamiento de materiales de ingeniería. Los procesos de difusión adquieren gran importancia cuando los materiales se utilizan o procesan a altas temperaturas.

Fusión y colado

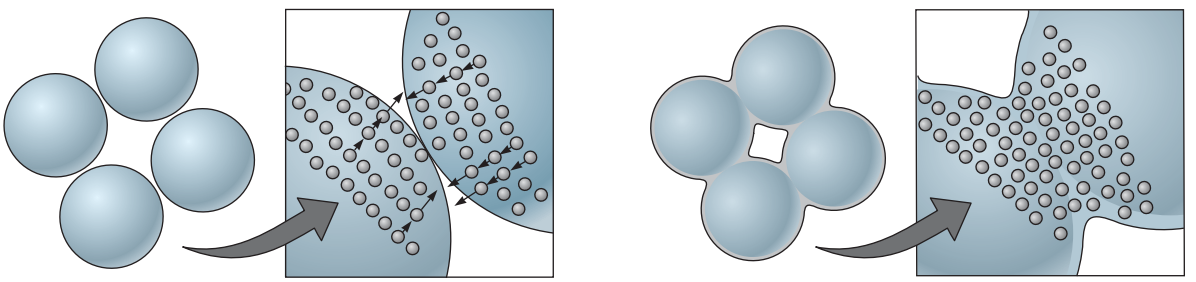
Uno de los métodos que más ampliamente se utilizan para procesar metales, aleaciones, muchos plásticos y vidrios involucra la fusión y el colado de materiales en una forma deseada. La difusión desempeña una tarea particularmente importante para solidificar metales y aleaciones. Por ejemplo, durante el crecimiento de monocristales de semiconductores, se debe asegurar que se tomen en cuenta las diferencias entre las difusiones de los dopantes en las formas fundida y sólida. Esta advertencia también se aplica a la difusión de elementos durante el colado de aleaciones. De manera similar, la difusión desempeña una función crucial en el procesamiento de vidrios. Por ejemplo, en los vidrios inorgánicos se debe tomar en cuenta que la difusión es lenta y que los vidrios inorgánicos no se cristalizan con facilidad. En el capítulo 9 se examinará este tema.

Sinterizado

Aunque los métodos de colado y fundición son muy populares para tratar muchos materiales manufacturados, los puntos de fusión de muchas cerámicas y algunos materiales metálicos son demasiado altos para procesar por medio de fusión y colado. Estos materiales relativamente refractarios se fabrican en formas útiles por medio de un proceso que requiere la consolidación de partículas pequeñas de un polvo en una masa sólida (capítulo 15). El **sinterizado** es el tratamiento a alta temperatura que ocasiona que las partículas se unan, lo que gradualmente reduce el volumen del espacio poroso entre ellas. La sinterización es una etapa frecuente en la fabricación de componentes cerámicos (por ejemplo, la alúmina, el titanato de bario, etc.) al igual que en la producción de partes metálicas por medio de la **metalurgia de polvos**, una ruta de procesamiento por medio de la cual se prensan polvos metálicos y se sinterizan para formar componentes densos monolíticos. Una variedad de materiales compuestos como las herramientas de corte basadas en carburo de tungsteno-cobalto se producen con base en esta técnica. Con partículas más finas, hay muchos átomos o iones en la superficie para los que no se satisfacen los enlaces atómicos o iónicos.

Como resultado, una colección de partículas finas de una cierta masa tiene una energía mayor que la de un material cohesivo sólido de la misma masa. Por lo tanto, la fuerza conductora de la sinterización de estado sólido de metales y cerámicas en polvo es la *reducción del área superficial total* de las partículas de polvo. Cuando se compacta en alguna forma un material en polvo, las partículas de éste están en contacto entre sí en numerosos sitios, con una cantidad significativa de espacio poroso entre ellas. Para reducir la energía total del material, los átomos se difunden entre los puntos de contacto, enlazan las partículas entre sí y con el tiempo ocasionan que los poros se contraigan.

La difusión reticular del volumen de las partículas en la región estrecha ocasiona su densificación. La difusión en la superficie, en fase gaseosa o de vapor y la difusión reticular de las superficies curvadas en el área estrecha entre las partículas no conducen a la densificación (capítulo 15). Si la sinterización se lleva a cabo durante un periodo largo, los poros pueden eliminarse y el material se densifica (figura 5-20). En la figura 5-21 se muestran las partículas de un polvo de un material cerámico conocido como tantalato de magnesio y bario [$Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ o BMT]. Este material cerámico es útil para fabricar componentes electrónicos conocidos como *resonadores dieléctricos* que



Producto compactado Producto sinterizado de manera parcial

Figura 5-20 Proceso de difusión durante la sinterización y la metalurgia de polvos. Los átomos se difunden entre los puntos de contacto, crean puentes y reducen el tamaño de los poros.

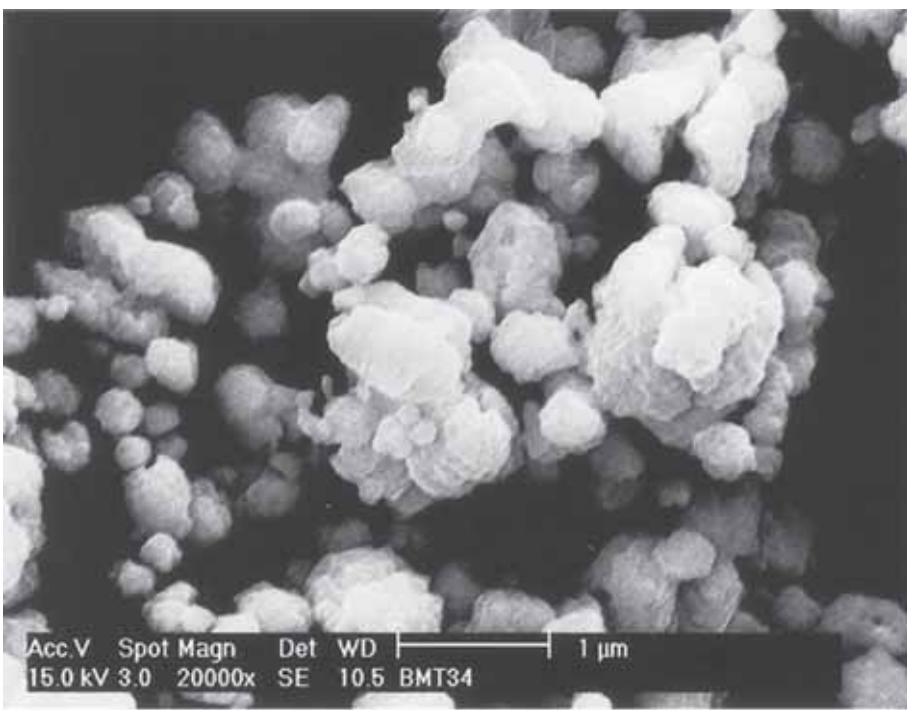


Figura 5-21 Muestra de partículas del polvo de tantalato de magnesio y bario [BMT] ($Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$]. Este material cerámico es útil para fabricar componentes electrónicos conocidos como resonadores dieléctricos que se usan en las comunicaciones inalámbricas. (*Cortesía de H. Shirey*)

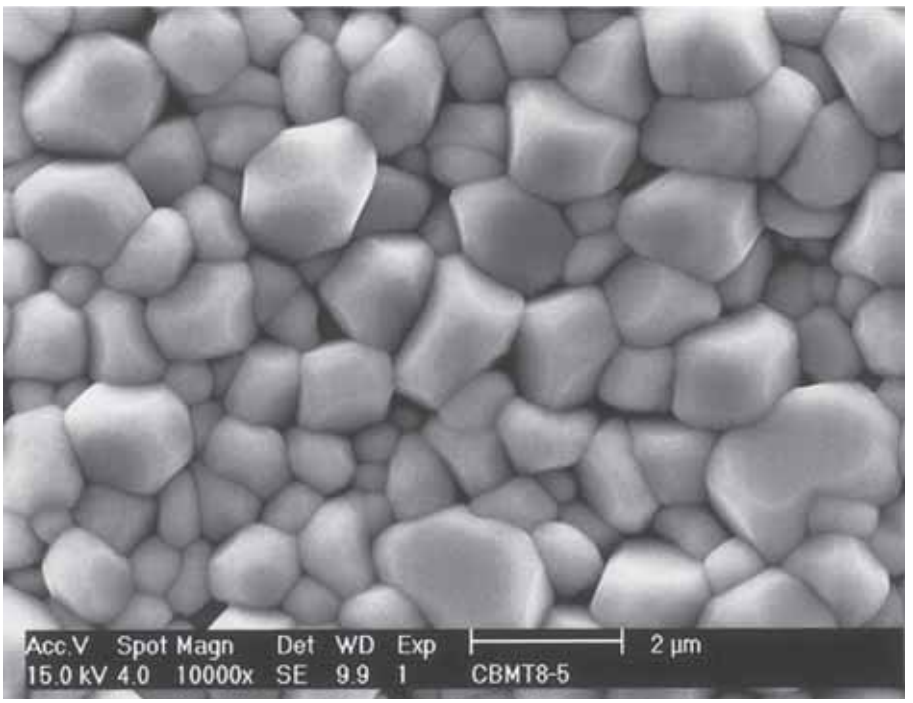


Figura 5-22 Microestructura de las cerámicas BMT obtenida por la compactación y sinterización de polvos de BMT. (*Cortesía de H. Shirey*)

se utilizan en sistemas de comunicación inalámbrica. En la figura 5-22 se muestra la microestructura de las cerámicas BMT. Estas cerámicas se produjeron mediante la compactación de los polvos en una prensa y la sinterización del compacto a una temperatura alta (~1500°C).

La extensión y la velocidad de la sinterización dependen de *a*) la densidad inicial de los compactos, *b*) de la temperatura, *c*) del tiempo, *d*) del mecanismo de sinterización, *e*) del tamaño promedio de la partícula y *f*) de la distribución del tamaño de las partículas de polvo. En algunas situaciones se forma una fase líquida en regiones localizadas del material cuando la sinterización está en proceso. Dado que la difusión de las especies, como átomos o iones, es más rápida en líquidos que en sólidos, la presencia de una fase líquida puede ser una manera conveniente de acelerar la sinterización de muchas formulaciones refractarias metálicas y cerámicas. Al proceso en el que se forma una cantidad pequeña de formas líquidas y ayuda a la densificación se le conoce como **sinterización en fase líquida**. Para que la fase líquida sea eficaz para mejorar la sinterización es importante tener un líquido que pueda "mojar" los granos, así como el agua moja una superficie de vidrio. Si el líquido no moja, de manera similar a como el mercurio no moja el vidrio, entonces la fase líquida no ayudará a mejorar la sinterización. En algunos casos se adicionan compuestos a los materiales para provocar que se forme una fase líquida a las temperaturas de sinterización. En otras situaciones, las impurezas pueden reaccionar con el material y provocar la formación de una fase líquida. En la mayoría de las aplicaciones, es deseable si la fase líquida es transitoria o se convierte en un material cristalino durante el enfriamiento. De esta manera no permanece en los límites de grano una fase amorfa vidriosa y quebradiza.

Cuando se necesitan densidades excepcionalmente altas, se aplica una presión (uniaxial o isostática) mientras el material está en proceso de sinterización. A estas técnicas se les conoce como **prensado en caliente**, cuando la presión es unidireccional, o **prensado isostático en caliente** (PIC), cuando la presión es isostática (es decir, aplicada en todas las direcciones). Muchas superaleaciones y cerámicas como el titanato de plomo, lantano o zirconio (PLZT) se procesan por medio de estas técnicas. El prensado isostático en caliente genera materiales con una densidad alta con propiedades isotrópicas (capítulo 15).

Crecimiento de granos

Los materiales policristalinos contienen gran cantidad de límites de grano, lo cual genera áreas de alta energía debido al empaquetamiento ineficiente de los átomos. El material tiene una energía total menor si la cantidad del área de los límites de granos

es reducida por el crecimiento de granos. El **crecimiento de granos** involucra el movimiento de los límites de grano, lo que permite que los granos mayores crezcan a expensas de los granos pequeños (figura 5-23). Si ha visto la espuma, ¡probablemente ha observado el principio del crecimiento de los granos! El crecimiento de los granos es similar a la manera en que las burbujas más pequeñas de la espuma desaparecen a expensas de las más grandes. Para que los granos de los materiales crezcan, se requiere la difusión de los átomos a través del límite de los granos y, en consecuencia, el crecimiento está relacionado con la energía de activación necesaria para que un átomo salte a través del límite. El incremento de tamaño de los granos puede observarse a partir de la secuencia de micrografías de las cerámicas de alúmina que se muestran en la figura 5-23. Otro ejemplo que demuestra que el crecimiento de los granos desempeña una función es el filamento de tungsteno (W) en una bombilla eléctrica. A medida que el filamento se calienta, los granos crecen y ocasionan que se debilite. El crecimiento de los granos, la vaporización del tungsteno y la oxidación por medio de la reacción con el oxígeno remanente contribuyen a la falla de los filamentos de tungsteno de las bombillas eléctricas.

La **fuerza impulsora** del crecimiento de los granos es la reducción del área de los límites de los granos, que son defectos cuya presencia ocasiona que aumente la energía libre del material. Por lo tanto, la tendencia termodinámica de los materiales policristalinos es transformarse en materiales con un tamaño promedio de los granos más grande. Las temperaturas altas o las energías de activación bajas incrementan el tamaño de los granos. Varios tratamientos térmicos de metales, entre ellos mantener el metal a temperaturas altas, deben controlarse con cuidado para *evitar* un crecimiento excesivo de los granos. Esto se debe a que, a medida que crece el tamaño promedio de los granos, disminuye el área de los límites de los granos y, en consecuencia, se reduce la resistencia al movimiento de las dislocaciones. Como resultado, la resistencia de un material metálico disminuye con el incremento del tamaño de los granos. Se ha visto este concepto antes en la forma de la ecuación de Hall-Petch (capí-

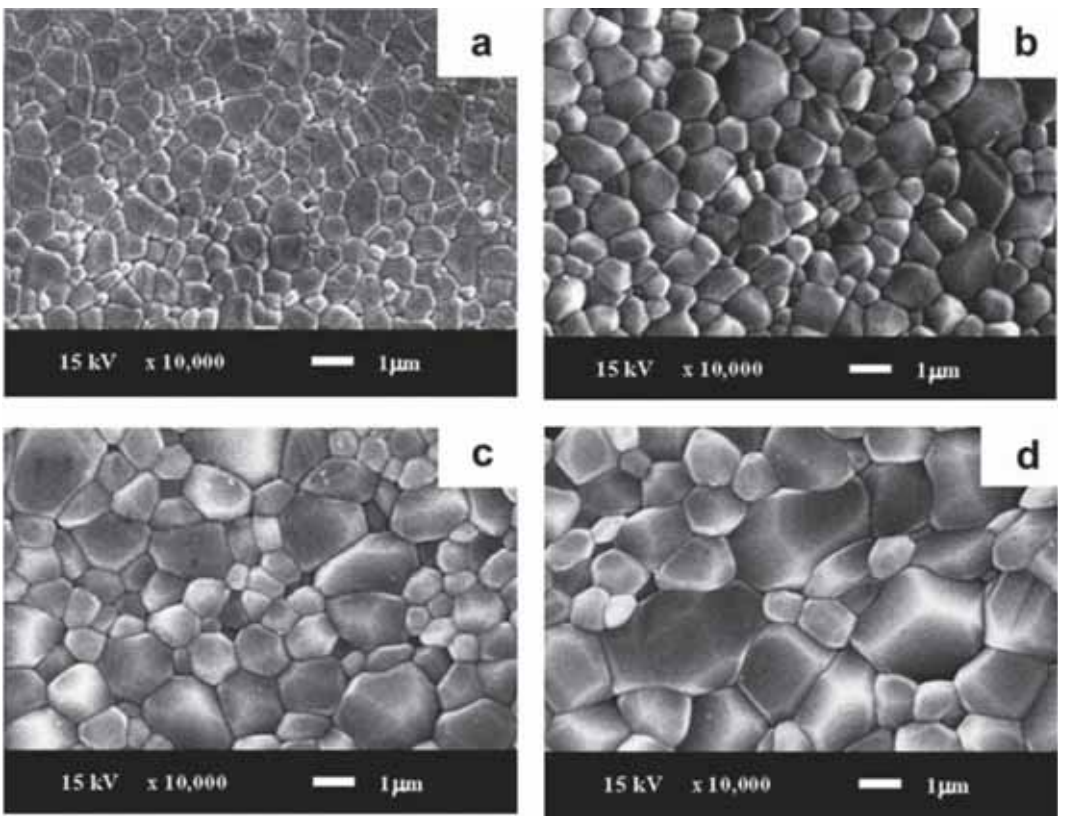


Figura 5-23 Micrografía electrónica de cerámica de alúmina sinterizada a 1350°C en un horno atmosférico con una tasa de calentamiento óptimo de 10°C/min y varios periodos de remojo de *a*) 0.5 h, *b*) 1.0 h, *c*) 2.0 y *d*) 5.0 h. (*Reimpreso con permiso de Elsevier, del texto* Current Applied Physics*, vol. 9, núm. 5. Chutinan Promdej, Varong Pavarajarn, Shigetaka Wada, Thanakorn Wasanapiarnpong, Tawatchai Charinpanitkul, "Effect of hot isostatically pressed sintering on microstructure of translucent alumina compact," pp. 960–966. Derechos reservados 2009*.)

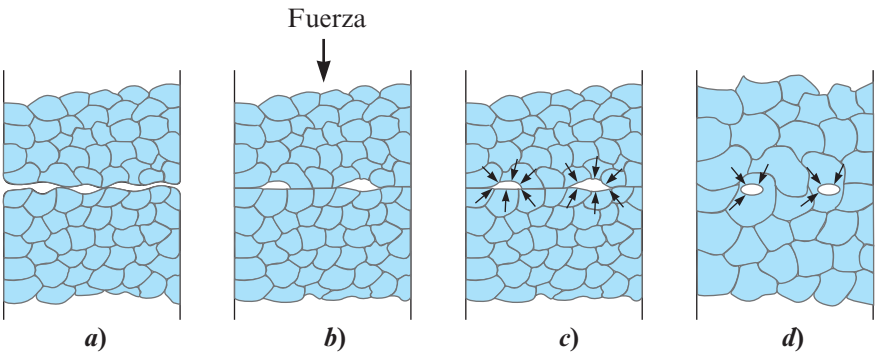


Figura 5-24 Etapas del enlazamiento por difusión: *a*) inicialmente el área de contacto es pequeña; *b*) la aplicación de una presión deforma la superficie, lo cual incrementa el área de enlace; *c*) la difusión por límite de los granos permite que los vacíos se contraigan, y *d*) la eliminación final de los vacíos requiere difusión por volumen.

tulo 4). En el **crecimiento normal de granos** el tamaño promedio de los granos aumenta de manera estable y la amplitud de la distribución del tamaño de los granos no es afectada de manera severa. Cuando se presenta el **crecimiento anormal de granos,** la distribución del tamaño de éstos tiende a ser bimodal (es decir, se obtienen unos cuantos granos que son muy grandes y unos cuantos que siguen siendo relativamente pequeños). Ciertas propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas de los materiales también dependen del tamaño de los granos de los materiales. Como resultado, durante el procesamiento de estos materiales se tiene que prestar mucha atención a los factores que afectan las velocidades de difusión y al crecimiento de granos.

Enlazamiento por difusión

Un método que se utiliza para unir materiales, llamado **enlazamiento por difusión**, se lleva a cabo en tres etapas (figura 5-24). La primera de ellas une las dos superficies entre sí a una temperatura y presión altas, lo cual aplana la superficie, fragmenta las impurezas y produce un área de alto contacto átomo-átomo. A medida que las superficies permanecen presionadas entre sí a altas temperaturas, los átomos se difunden a lo largo de los límites de los granos a los vacíos restantes; luego se condensan y reducen el tamaño de cualquier vacío en la interfase. Debido a que la difusión por límite de los granos es rápida, esta segunda etapa puede llevarse a cabo de manera también muy rápida. Sin embargo, con el tiempo el crecimiento de granos aísla los vacíos restantes de los límites de los granos. En la tercera etapa, que implica la eliminación final de los vacíos, debe llevarse a cabo una difusión por volumen, la cual es comparativamente lenta. Con frecuencia, el proceso de enlazamiento por difusión se utiliza para unir metales reactivos como el titanio, para unir metales y materiales disímiles y para unir cerámicas.

Resumen

- El flujo neto de átomos, iones, etc., que resulta de la difusión depende del gradiente de concentración inicial.
- En gran medida, la cinética de la difusión depende de la temperatura. En general, este es un proceso activado térmicamente y la dependencia del coeficiente de difusión de la temperatura está dada por la ecuación de Arrhenius.
- La extensión de la difusión depende de la temperatura, del tiempo, de la naturaleza y concentración de la especie que se está difundiendo, de la estructura cristalina, de la composición de la matriz, de la estequiometría y de los defectos puntuales.
- El estímulo o la limitación del proceso de difusión forman la base de muchas tecnologías importantes. Los ejemplos incluyen el procesamiento de semiconductores, tratamientos térmicos de materiales metálicos, sinterización de cerámicas y metales en polvo, formación de materiales amorfos, solidificación de materiales fusionados durante un proceso de colado, enlazamiento por difusión, plásticos, películas y recubrimientos de barrera.

- Las leyes de Fick describen cuantitativamente el proceso de difusión. La primera de ellas define la relación entre el gradiente de concentración y el flujo de la especie que se está difundiendo. La segunda describe la variación de la concentración de la especie que se está difundiendo bajo condiciones de difusión de estado no estacionario.
- En un sistema en particular, la magnitud de la difusión está relacionada con el término Dt, el cual permite determinar el efecto de un cambio en la temperatura sobre el tiempo que requiere el proceso controlado por difusión.
- Los dos mecanismos importantes para activar el movimiento atómico en los materiales cristalinos son la difusión por vacancia y la difusión intersticial.
- La velocidad de difusión está regida por la relación de Arrhenius, es decir, la velocidad aumenta de manera exponencial con la temperatura. La difusión es particularmente significativa a temperaturas por encima de casi 0.4 veces la temperatura de fusión (en kelvin) del material.
- La energía de activación Q describe la facilidad con la que los átomos se difunden, con una difusión rápida que ocurre cuando la energía de activación es baja. Se obtienen una energía de activación baja y una velocidad de difusión rápida en 1) la difusión intersticial en comparación con la difusión por vacancia, 2) estructuras cristalinas con un factor de empaquetamiento menor, 3) materiales con una temperatura de fusión baja o un enlazamiento atómico débil y 4) la difusión a lo largo de los límites de los granos o en las superficies.
- El movimiento total de los átomos, o flujo, aumenta cuando el gradiente de concentración y la temperatura se incrementan.
- Por lo general, la difusión de los iones en las cerámicas es más lenta que la de los átomos en materiales metálicos. La difusión en las cerámicas también es afectada de forma significativa por la ausencia de estequiometría, los dopantes y la posible presencia de fases líquidas durante la sinterización.
- La difusión de los átomos es de importancia primordial, debido a que muchas de las técnicas de procesamiento de materiales, como la sinterización, la metalurgia de polvos y el enlazamiento por difusión, requieren de la difusión. Además, muchos de los tratamientos térmicos y de los mecanismos de endurecimiento que se utilizan para controlar las estructuras y propiedades de los materiales son procesos controlados por la difusión. La estabilidad de la estructura y las propiedades de los materiales durante su uso a temperaturas altas dependen de la difusión.

Glosario

Autodifusión Movimiento al azar de los átomos dentro de un material en esencia puro. No hay un cambio neto en los resultados de la composición.

Carburización Tratamiento térmico para aceros cuya finalidad es endurecer la superficie utilizando una fuente gaseosa o sólida de carbono. El carbono que se difunde en la superficie le otorga mayor dureza y resistencia ante la abrasión.

Cerámicas conductoras Materiales cerámicos que son buenos conductores de electricidad como resultado de sus portadores de carga iónica y electrónica (electrones, orificios o iones). La zirconia estabilizada y el óxido de indio y estaño son ejemplos de tales materiales.

Coeficiente de difusión Coeficiente dependiente de la temperatura relacionado con la velocidad a la que se difunden los átomos, iones u otra especie. El coeficiente de difusión depende de la temperatura, la composición y la microestructura del material anfitrión, y también de la concentración de la especie que se está difundiendo.

Crecimiento anormal de los granos Tipo de crecimiento de los granos observado en los metales y las cerámicas. En este modo de crecimiento de los granos, por lo general emerge una distribución bimodal del tamaño de los granos a medida que algunos de éstos se agrandan demasiado a expensas de los granos más pequeños. Vea "Crecimiento de los granos" y "Crecimiento normal de los granos".

Crecimiento de granos Movimiento de los límites de grano debido a la difusión para reducir la cantidad de área de los límites de grano. Como resultado, los granos pequeños se contraen y desaparecen mientras que otros

se agrandan, de manera similar a la forma en que algunas burbujas de la espuma del jabón crecen a expensas de las burbujas más pequeñas. En muchas situaciones no es deseable este tipo de crecimiento.

Crecimiento normal de granos Crecimiento de los granos que se lleva a cabo mediante un esfuerzo para reducir el área de los límites de los granos. Este tipo de crecimiento se distingue del crecimiento anormal en que la distribución del tamaño de los granos permanece unimodal, pero su tamaño promedio aumenta de manera estable.

Difusión Flujo neto de átomos, iones u otra especie dentro de un material inducido por la temperatura y el gradiente de concentración.

Difusión intersticial Difusión de átomos pequeños de una posición intersticial a otra en la estructura cristalina.

Difusión por límite de granos Difusión de los átomos a lo largo de los límites de los granos, más rápida que la difusión por volumen, debido a que los átomos están menos compactados en los límites de los granos.

Difusión por superficie Difusión de los átomos a lo largo de las superficies, como grietas o superficies de partículas.

Difusión por vacancia Difusión de los átomos cuando uno de ellos deja una posición de red regular para llenar una vacancia en el cristal. Este proceso crea una nueva vacancia y el proceso se repite.

Difusión por volumen Difusión de los átomos a través del interior de los granos.

Difusividad Otro término para designar el coeficiente de difusión.

Distancia de la difusión Distancia máxima o deseable a la que los átomos deben difundirse; con frecuencia, la distancia entre las localizaciones de las concentraciones máxima y mínima del átomo que se está difundiendo.

Energía de activación Energía que se requiere para provocar que se lleve a cabo una reacción en particular. En la difusión, la energía de activación está relacionada con la energía que se necesita para mover un átomo de un sitio de red a otro.

Enlazamiento por difusión Técnica de unión en la que se prensan dos superficies entre sí a altas presiones y temperaturas. La difusión de los átomos en la interfase llena los vacíos y produce un enlace fuerte entre las superficies.

Flujo Número de átomos u otra especie en proceso de difusión que pasa a través de un plano de unidad de área por unidad de tiempo. Está relacionado con la velocidad a la que la masa es transportada por la difusión en un sólido.

Fuerza impulsora Causa que induce un efecto. Por ejemplo, un incremento del gradiente en la composición aumenta la difusión; de manera similar, la reducción del área de superficie de las partículas de polvo es la fuerza impulsora de la sinterización.

Gradiente de concentración Velocidad del cambio de composición con la distancia en un material no uniforme, que por lo general se expresa en $\frac{\text{átomos}}{\text{m}^2 \cdot \text{m}}$ o %at/m.

Interdifusión Difusión de átomos diferentes en direcciones opuestas. Con el transcurso del tiempo, la interdifusión puede producir una concentración de equilibrio de los átomos dentro del material.

Metalurgia de polvos Método para producir partes metálicas monolíticas; los polvos metálicos se compactan para lograr una forma deseada, la cual se calienta a fin de permitir la difusión y se sinteriza para unir los polvos en una masa sólida.

Nitruración Proceso en el que se difunde nitrógeno en la superficie de un material, como un acero, lo que conduce al incremento de la dureza y la resistencia al desgaste.

Par de difusión Combinación de elementos involucrados en los estudios de la difusión (por ejemplo, si se está considerando la difusión de Al en Si, el Al-Si es un par de difusión).

Permeabilidad Medida relativa de la velocidad de difusión en materiales, que con frecuencia se aplica a plásticos y recubrimientos. A menudo se utiliza como un parámetro de diseño en la ingeniería que describe la eficacia de un material en particular para servir como una barrera contra la difusión.

Prensado en caliente Proceso de sinterización conducido bajo una presión uniaxial, que se utiliza para lograr densidades mayores.

Prensado isostático en caliente Proceso de sinterización en el que se aplica una presión uniforme en todas las direcciones durante la sinterización. Este proceso se utiliza para obtener densidades muy altas y propiedades isotrópicas.

Primera ley de Fick Ecuación que relaciona el flujo de átomos por difusión con el coeficiente de difusión y el gradiente de concentración.

Recubrimientos de barrera térmicos (RBT) Recubrimientos que se utilizan para proteger del calor un componente.

Segunda ley de Fick Ecuación diferencial parcial que describe la velocidad a la que los átomos se redistribuyen en un material por medio de la difusión. Existen muchas soluciones para esta ley; la ecuación 5-7 es una solución posible.

Sinterizado Tratamiento a temperaturas altas que se utiliza para unir partículas pequeñas. La difusión de los átomos a los puntos de contacto provoca que se formen puentes entre las partículas. La difusión posterior llena con el tiempo cualquier vacío restante. La fuerza impulsora del sinterizado es una reducción del área de superficie total de las partículas de polvo.

Sinterizado en fase líquida Proceso de sinterización en el que se forma una fase líquida. Dado que la difusión es más rápida en los líquidos, si la fase líquida puede mojar los granos, puede acelerar el proceso de sinterización.

Problemas

Sección 5-1 Aplicaciones de la difusión

5-1 ¿Cuál es la fuerza impulsora para la difusión?

5-2 Proporcione tres ejemplos de procesos de materiales que dependan de la difusión en los sólidos y explique la forma en la que la difusión resulta fundamental para uno de ellos.

5-3 En el tratamiento de carburización de aceros, ¿cuáles son las especies que intervienen en el proceso de difusión?

5-4 ¿Por qué se usa el plástico PET para fabricar botellas de bebidas carbonatadas?

5-5 ¿Por qué a pesar de que el metal aluminio se oxida con mayor rapidez que el hierro se considera como un metal que por lo general no se "corroe"?

5-6 ¿Qué es un recubrimiento de barrera térmica? ¿Dónde se emplean tales recubrimientos?

5-7 ¿Qué es un tratamiento térmico de nitruración?

5-8 Cierto componente mecánico se trata térmicamente por medio de carburización. Un problema común de ingeniería es que se necesita maquinar cierta parte del componente y esta parte de la superficie no debe endurecerse. Explique cómo se puede lograr este objetivo.

Sección 5-2 Estabilidad de átomos e iones

5-9 Escriba la ecuación de Arrhenius y explique los diferentes términos.

5-10 Los átomos se mueven de una posición de red a otra a una velocidad de 5×10^5 saltos/s a 400°C cuando la energía de activación de su movimiento es de 1.255×10^5 J/mol. Calcule la velocidad de los saltos a 750°C.

5-11 El número de vacancias en un material se relaciona con la temperatura por medio de una ecuación de Arrhenius. Si la fracción de puntos de red que contienen vacancias es de 8×10^{-5} a 600°C, determine la fracción de puntos de red que contienen vacancias a 1,000°C.

5-12 La ecuación de Arrhenius fue desarrollada originalmente para comparar las velocidades de las reacciones químicas. Compare las velocidades de una reacción química a 20 y 100°C calculando la razón de las velocidades de las reacciones químicas. Suponga que la energía de activación de los líquidos en la que se realiza la reacción química es de 10 kJ/mol y que la reacción está limitada por la difusión.

Sección 5-3 Mecanismos de difusión

5-13 ¿Cuáles son los distintos mecanismos de difusión?

5-14 *a*) Compare los mecanismos atómicos de difusión intersticial y de vacancia y
b) enuncie dos razones por las que la difusión intersticial tiende a ser más rápida que la de vacancia.

5-15 ¿Cómo se verifica de manera experimental la autodifusión de los átomos en los metales?

Sección 5-4 Energía de activación de la difusión

5-16 ¿Por qué la energía de activación de la difusión por medio del mecanismo intersticial es menor que las de otros mecanismos?

5-17 Compare los coeficientes de difusión del carbono en hierro CCCu y CCCa a la temperatura de transformación alotrópica de 912°C y explique la diferencia.

5-18 Compare los coeficientes de difusión del hidrógeno y el nitrógeno en hierro CCCa a 1000°C y explique la diferencia.

5-19 En ocasiones, la energía de activación se expresa como (eV/átomo). Por ejemplo, vea la figura 5-15 que ilustra los coeficientes de difusión de

los iones en distintos óxidos. Convierta eV/átomo en J/mol.

5-20 Con el fin de fabricar un semiconductor se ejecuta un proceso de dopaje en el que se difunde fósforo sobre germanio. Si $D_0 = 2 \times 10^{-4} m^2/s$ y la energía de activación es de 240.6 J/mol, determine la difusividad de P en Ge a 800°C.

5-21 La energía de activación de la difusión del cobre en plata es de 193,000 J/mol. Calcule el coeficiente de difusión a 1,200 K dado que el valor de D a 1000 K es de $1.0 \times 10^{-14} m^2/s$.

5-22 Determine el coeficiente de difusión D de la difusión del hidrógeno en hierro CCCa a 800°C.

5-23 El coeficiente de difusión del Cr^{3+} en Cr_2O_3 es de 6×10^{-19} m²/s a 727°C y de 1×10^{-13} m²/s a 1400°C. Calcule

a) la energía de activación y

b) la constante D_0.

5-24 El coeficiente de difusión del O^{2-} en el Cr_2O_3 es de 4×10^{-19} m²/s a 1,150°C y de 6×10^{-15} m²/s a 1715°C. Calcule

a) la energía de activación y

b) la constante D_0.

5-25 Sin referirse a la información real, ¿puede predecir si la energía para activar la difusión del carbono en hierro CCCa es mayor o menor que la que requiere el hierro CCCu? Explique su respuesta.

Sección 5-5 Velocidad de difusión (primera ley de Fick)

5-26 Escriba la primera ley de Fick de la difusión. Explique de manera clara qué significa cada término.

5-27 ¿Cuál es la diferencia entre la difusividad y el coeficiente de difusión?

5-28 Determine la temperatura máxima permisible para producir un flujo menor a $2 \times 10^7 \frac{\text{átomos de H}}{m^2 \cdot s}$ en una hoja de hierro CCCu cuando el gradiente de concentración es de $-5 \times 10^{20} \frac{\text{átomos}}{m^3 \cdot m}$.

5-29 Calcule los coeficientes de difusión del hidrógeno en el hierro CCCu y del aluminio CCCa a temperatura ambiente (25°C). En el caso de la difusión de H en Al, $D_0 = 1.1 \times 10^{-5}$ m²/s y $Q = 40.92$J/mol. Con base en sus cálculos determine qué material sería mejor para un tanque de almacenamiento de hidrógeno a alta presión.

5-30 ¿Cómo afectaría la presión interna del hidrógeno a la tasa de difusión en un tanque de presión? Explique su respuesta.

5-31 Se usa una hoja de hierro CCCu de 1 mm de grosor para separar una región de una concentración alta de gas nitrógeno de 0.1 porcentaje atómico de una región de concentración baja de gas nitrógeno a 650°C. Si el flujo del nitrógeno a través de la hoja es de $10^{16} \frac{\text{átomos}}{m^2 \cdot s}$, ¿cuál es la concentración de nitrógeno en la región de concentración baja?

5-32 Una oblea de silicio de 0.2 mm de grosor se trata de tal manera que se produce un gradiente de concentración uniforme del antimonio. Una superficie contiene 1 átomo de Sb por 10^8 átomos de Si y la otra contiene 500 átomos de Sb por 10^8 átomos de Si. El parámetro de red del Si es de 0.54307nm (apéndice A). Calcule el gradiente de concentración en

a) el porcentaje atómico de Sb por m y

b) $\frac{\text{átomos de Sb}}{m^2 \cdot m}$.

5-33 Cuando se solidifica una aleación de Cu-Zn, una porción de la superficie contiene un porcentaje atómico de 25 de zinc y la otra porción a 0.025 mm contiene un porcentaje atómico de 20 de zinc. El parámetro de red para la aleación CCCa es alrededor de 0.363 nm. Determine el gradiente de concentración en

a) el porcentaje atómico de Zn por m,

b) el porcentaje en peso de Zn por m y

c) $\frac{\text{átomos de Zn}}{m^3 \cdot m}$.

5-34 Se usa una hoja de hierro CCCu de 0.001 pulg para separar un contenido alto de gas hidrógeno de un contenido bajo del mismo gas a 650°C. Hay 5×10^{14} átomos de H/m³ en equilibrio en un lado de la hoja y 2×10^9 átomos de H/m³ en equilibrio en el otro lado. Determine

a) el gradiente de concentración del hidrógeno y

b) el flujo del hidrógeno a través de la hoja.

5-35 Calcule el número de kilogramos de hidrógeno por hora que pasan a través de una hoja de paladio de 5 mm de espesor si tiene un área de 0.20 m² a 500°C. Suponga que el coeficiente de difusión es de 1.0×10^{-8} m²/s y que las concentraciones altas y bajas son de 2.4 y 0.6kg de hidrógeno por m³ de paladio. Suponga que las condiciones de estado son estables.

5-36 Se usa una hoja de hierro CCCa de 1 mm de grosor para contener nitrógeno en un intercambiador de calor a 1200°C. La concentración del N en una superficie señala un porcentaje atómico de 0.04 y la concentración en la segunda superficie es de 0.005. Determine el flujo del nitrógeno a través de la hoja en átomos de N/(m²/s).

5-37 Un contenedor esférico de hierro CCCu de 40 mm de diámetro y 0.5 mm de grosor mantiene nitrógeno a 700°C. La concentración en la superficie interna señala un porcentaje atómico de 0.05 y en la superficie externa es de 0.002. Calcule el número de gramos de nitrógeno por hora que se pierden del contenedor.

5-38 Se debe a fabricar una estructura de hierro CCCu que no permita más que una pérdida de 50 g de hidrógeno por año a través de cada centímetro cuadrado de hierro a 400°C. Si la concentración de hidrógeno en una superficie es de 0.05 átomos de H por celda unitaria y de 0.001 átomos de H por celda unitaria en la segunda superficie, determine el grosor mínimo del hierro.

5-39 Determine la temperatura máxima permisible que producirá un flujo menor que $2 \times 10^7 \frac{\text{átomos de H}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ a través de una hoja de hierro CCCu cuando el gradiente de concentración es de $-5 \times 10^{24} \cdot \frac{\text{átomos}}{\text{m} \cdot \text{m}^3}$. (Observe el signo negativo del flujo.)

Sección 5-6 Factores que afectan la difusión

5-40 Escriba la ecuación que describe la dependencia de D de la temperatura.

5-41 En los sólidos, el proceso de difusión de los átomos e iones toma tiempo. Explique cómo se aprovecha esta característica mientras se fabrican vidrios metálicos.

5-42 ¿Por qué se forman vidrios inorgánicos en el enfriamiento relativamente lento de productos fundidos, mientras que se necesita la solidificación rápida para formar vidrios metálicos?

5-43 ¿Se espera que, en materiales iónicos, la difusión de los cationes sea más rápida que la de los aniones? Explique su respuesta.

5-44 Utilice la información de la difusión que se incluye en la tabla de abajo sobre átomos en hierro con el fin de responder las siguientes preguntas. Suponga condiciones de equilibrio metaestables y cantidades muy pequeñas de C en Fe. La constante de los gases en unidades SI es de 8.314 J/(mol · K).

Par de difusión	Mecanismo de difusión	Q (J/mol)	D_0 (m²/s)
C en hierro CCCa	Intersticial	1.38×10^5	2.3×10^{-5}
C en hierro CCCu	Intersticial	8.74×10^4	1.1×10^{-6}
Fe en hierro CCCa	Por vacancia	2.79×10^5	6.5×10^{-5}
Fe en hierro CCCu	Por vacancia	2.46×10^5	4.1×10^{-4}

a) Grafique el coeficiente de difusión como una función del inverso de la temperatura ($1/T$) que muestre los cuatro pares de difusión incluidos en la tabla.

b) Recuerde que las temperaturas de las transiciones de fases del hierro, y en cada caso, indican en la gráfica el intervalo de temperaturas a las que la información de la difusión es válida.

c) ¿Por qué la energía para activar la difusión del Fe es mayor que la de la difusión del C en hierro?

d) ¿Por qué la energía para activar la difusión es mayor en el hierro CCCa cuando se compara con el hierro CCCu?

e) ¿El C se difunde más rápido en el Fe CCCa que en el Fe CCCu? Fundamente su respuesta con un cálculo numérico y enuncie cualquier supuesto que haya formulado.

5-45 La gráfica que se muestra a continuación tiene tres líneas que representan la autodifusión por límites de grano, por superficie y por volumen en un metal. Una las líneas etiquetadas A, B y C con el tipo de difusión. Justifique su respuesta calculando la energía para activar la difusión en cada caso.

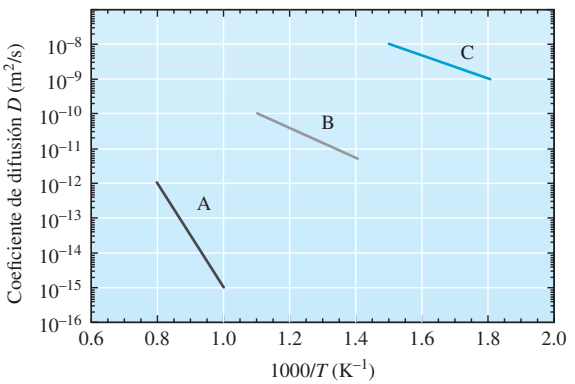


Figura 5-25 Gráfica del problema 5-45.

Sección 5-7 Permeabilidad de los polímeros

5-46 ¿Qué son los polímeros de barrera?

5-47 ¿Cuáles factores, distintos de la permeabilidad, son importantes para seleccionar un polímero para fabricar botellas de plástico?

5-48 El PET amorfo es más permeable al CO_2 que el PET que contiene microcristalitos. Explique la causa de ello.

Sección 5-8 Perfil de composición (segunda ley de Fick)

5-49 Se debe realizar una difusión de zinc puro sobre cobre sumergiendo el cobre en zinc fundido a 450°C. Calcule el tiempo que se tardaría en obtener un porcentaje de 10% en peso de zinc a una profundidad de 0.5 mm por debajo de la superficie del cobre. Este procedimiento, ¿es comercialmente viable? ¿Qué problemas prácticos podrían surgir si se incrementa la temperatura a 1,000°C? Utilice la tabla 5-4 de los valores de la función de error según sea necesario. El coeficiente de difusión a 450°C es de $D = 6.3 \times 10^{-17}\text{m}^2/\text{s}$.

5-50 La nitruración es un proceso en el que se difunde nitrógeno en una superficie de acero para incrementar la resistencia de un componente. Se ha determinado que se obtiene una capa de nitrógeno de profundidad satisfactoria en el

Tabla 5-4 Valores de la función de error (erf)

z	erf (*z*)	*z*	erf (*z*)	*z*	erf (*z*)
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7969	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

hierro CCCu después de una hora de exposición a 700°C. ¿Cuánto tiempo se necesitaría para producir una capa de profundidad satisfactoria si el proceso de nitruración se llevara a cabo a 600°C?

5-51 Determine el tiempo de carburización necesario para alcanzar una concentración de 0.30% de carbono en peso a 4 mm en una aleación de acero que originalmente contiene 0.10% de carbono en peso. Considere que la concentración en la superficie debe mantenerse a 0.90% en peso de carbono y que el tratamiento se llevará a cabo a una temperatura de 1,100°C. Utilice los datos de difusión en hierro CCCa y los valores de la función de error de la tabla 5-4 según sea necesario.

5-52 El enlazamiento por difusión se emplea como método de fabricación de componentes aeroespaciales complejos. Se intenta unir una hoja de níquel, capaz de alejar rápidamente los rayos de los lugares críticos, con un plato de hierro (acero inoxidable) CCCa. Cuando los dos metales se unen a 800°C se logra un buen enlazamiento en 8 horas. ¿Cuánto tiempo tardaríamos en obtener este resultado si decidimos realizar el enlazamiento a 600°C? (Suponga que la calidad del enlazamiento está determinada por la velocidad de difusión en el hierro CCCa).

5-53 Determine el tiempo de carburización necesario para alcanzar una concentración de 0.45% de carbono en peso a 2 mm en una aleación de acero que originalmente tiene 0.20% de carbono en peso. Considere que la concentración en la superficie debe mantenerse a 1.30% en peso de carbono a 1000°C. Utilice los valores de la función de error de la tabla 5-4 según sea necesario.

5-54 Se debe hacer una difusión de nitrógeno en fase gaseosa sobre hierro puro CCCu a 700°C. Si la concentración en la superficie se mantiene a 0.10% en peso del N, ¿cuál sería la concentración a 1 mm de la superficie después de 10 horas? Utilice los valores de la función de error de la tabla 5-4 según sea necesario.

5-55 Se necesita incrementar la resistencia de una superficie de acero carbono de 0.10% en peso mediante carburización. Se coloca el acero en una atmósfera que proporciona un porcentaje máximo de peso en carbono de 1.2% sobre una superficie de acero a alta temperatura. El carbono se difunde 2 mm sobre la superficie del acero hasta alcanzar una concentración de 0.45% de carbono en peso a esa profundidad. ¿Cuánto tardará el proceso de carburización si el coeficiente de difusión es de $2 \times 10^{-11} m^2/s$? Utilice los valores de la función de error de la tabla 5-4 según sea necesario.

5-56 Los transistores se fabrican dopando silicio monocristalino con distintos tipos de impurezas para generar regiones del tipo *n* y *p*. El fósforo y el boro son especies dopantes comunes del tipo *n* y *p*, respectivamente. Suponiendo que se utiliza un tratamiento térmico a 1,100°C durante 1 h para provocar la difusión de los dopantes, calcule la concentración constante en la superficie del P y el B necesaria con el fin de alcanzar una concentración de 10^{18} átomos/cm^3 a una profundidad de 0.1 mm de la superficie en las regiones de los tipos *n* y *p*. Los coeficientes de difusión del P y el B en silicio monocristalino a 1100°C son de $6.5 \times 10^{-17} m^2/s$ y de $6.1 \times 10^{-17} m^2/s$, respectivamente.

5-57 Considere una oblea de silicio de 2 mm de grosor que se va a dopar con antimonio. Suponga que la fuente del dopante (mezcla gaseosa de cloruro de antimonio y otros gases) genera una

concentración constante de 10^{22} átomos/m^3. Se necesita un perfil del dopante tal que la concentración de Sb a una profundidad de 1 micrómetro sea de 5×10^{21} átomos/m^3, ¿cuál es el tiempo que requiere el tratamiento térmico de la difusión? Suponga que la oblea de silicio con la que se comienza no contiene impurezas o dopantes. Además, que la energía para activar la difusión del Sb en silicio es de 380 kJ/mol y que el D_0 para difundir el Sb en Si es de 1.3×10^{-3} m^2/s. Suponga que $T = 1{,}250$°C.

5-58 Considere el dopado del silicio con galio. Suponga que el coeficiente de difusión del galio en Si a 1,100°C es de 7×10^{-17}m^2/s. Calcule la concentración del Ga a una profundidad de 2.0 micrómetros si la concentración de este elemento en la superficie es de 10^{29} átomos/m^3. Los tiempos de difusión son de 1, 2 y 3 horas.

5-59 Compare la velocidad a la que los iones oxígeno se difunden en la alúmina (Al_2O_3) con la velocidad a la que los iones aluminio se difunden en el Al_2O_3 a 1,500°C. Explique la diferencia.

5-60 Se lleva a cabo un proceso de carburización en un acero CCCa con 0.10%C introduciendo 1.0% de C en la superficie a 980°C. Calcule el contenido de carbono a 0.01 cm, 0.05 cm y 0.10 cm debajo de la superficie después de 1 h.

5-61 Se calienta a 912°C un hierro que contiene 0.05% de C en una atmósfera que produce 1.20% de C en la superficie y se mantiene durante 24 h. Calcule el contenido de carbono a 0.5 mm debajo de la superficie si

a) el hierro es CCCu y
b) el hierro es CCCa.

Explique la diferencia.

5-62 ¿Qué temperatura se requiere para obtener 0.50% de C a una distancia de 0.5 mm debajo de la superficie de un acero con 0.20% de C en 2 h, cuando está presente 1.10% de C en la superficie? Suponga que el hierro es CCCa.

5-63 Se va a carburizar un acero con 0.15% de C a 1,100°C, lo que da 0.35% de C a una distancia de 1 mm debajo de la superficie. Si la composición de la superficie se mantiene a 0.90% de C, ¿qué tiempo se requiere?

5-64 Se debe carburizar un acero con 0.02% de C a 1,200°C en 4 h, con 0.45% de carbono a 0.6 mm debajo de la superficie. Calcule el contenido de carbono que se requiere en la superficie del acero.

5-65 Una herramienta de acero con 1.2% de C que se mantiene a 1,150°C se expone a oxígeno durante 48 h. El contenido de carbono en la superficie del acero es cero. ¿A qué profundidad se descarburiza el acero a menos de 0.20% de C?

5-66 Un acero con 0.80% de C debe operar a 950°C en un ambiente oxidante para el que el carbono que contiene la superficie del acero sea cero. Sólo los 0.2 mm de la parte más externa del acero pueden bajar de 0.75% de C. ¿Cuál es el tiempo máximo que puede operar esa parte de acero?

5-67 Un acero con estructura cristalina CCCu que contiene 0.001% de N se nitrura a 550°C durante 5 h. Si el porcentaje de nitrógeno que contiene la superficie del acero llega a 0.08%, determine el nitrógeno contenido a 0.25 mm de la superficie.

5-68 ¿Qué tiempo se requiere para nitrurar un acero con 0.002% de N para obtener 0.12% de N a una distancia de 0.0508 mm debajo de la superficie a 625°C? El contenido de nitrógeno en la superficie llega a 0.15%.

5-69 Se puede desarrollar con éxito un tratamiento térmico de carburización a 1,200°C en 1 h. En un esfuerzo para reducir el costo de reemplazar el revestimiento de los ladrillos en el horno, se propone reducir la temperatura de carburización a 950°C. ¿Qué tiempo se requiere para obtener un tratamiento de carburización similar?

5-70 Durante la solidificación de una aleación de Cu-Zn, se encuentra que la composición no es uniforme. Cuando se calienta la aleación a 600°C durante 3 h, la difusión del zinc ayuda a hacer más uniforme la composición. ¿Qué temperatura se requiere si se desea desarrollar este tratamiento de homogenización en 1,800 segundos?

5-71 Para controlar la profundidad de la unión en los transistores se introducen cantidades precisas de impurezas a profundidades relativamente superficiales por medio de la implantación de iones que se difunden en el sustrato de silicio mediante un tratamiento térmico subsecuente. Esto puede aproximarse como un problema de difusión con una fuente finita. Aplicando las condiciones limitantes apropiadas, la solución a la segunda ley de Fick en estas condiciones es

$$c(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi\, Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right)$$

donde Q es la concentración inicial en la superficie en unidades de átomos/m^2. Suponga que se implantan 10^{18} átomos/m^2 de fósforo en la superficie de la oblea de silicio con una concentración del boro de fondo de 10^{24} átomos/m^3 y esta oblea se recuece de manera subsecuente a 1,100°C. El coeficiente de difusión del fósforo en silicio a 1,100°C es de 6.5×10^{-17} m^2/s.

a) Trace una gráfica de la concentración c (átomos/m^3) en función de x (cm) para un tiempo de recocido de 300 s, 600 s y 900 s.

b) ¿Cuál es el tiempo de recocido que se requiere para que la concentración del fósforo sea igual a la concentración del boro a una profundidad de 1 μm?

Sección 5-9 Difusión y procesamiento de materiales

5-72 Organice los siguientes materiales en orden ascendente de su coeficiente de autodifusión: gas Ar, agua, aluminio monocristalino y aluminio líquido a 700°C.

5-73 La mayoría de los metales y aleaciones pueden procesarse mediante la ruta de fusión y colado, pero por lo general no se aplica este método para procesar metales específicos (por ejemplo, W) y la mayoría de las cerámicas. Explique su respuesta.

5-74 ¿Qué es el sinterizado? ¿Cuál es su fuerza impulsora?

5-75 ¿Por qué ocurre el crecimiento de los granos? ¿Qué significan los términos crecimiento normal y anormal de los granos?

5-76 ¿Por qué se espera que la resistencia de muchos materiales metálicos disminuya con el incremento del tamaño de los granos?

5-77 Una parte cerámica hecha de MgO se sinteriza con éxito a 1,700°C en 90 minutos. Para minimizar los esfuerzos térmicos durante este proceso, se planea reducir la temperatura a 1500°C. ¿Qué limitará la velocidad a la que la sinterización puede realizarse: la difusión de los iones de magnesio o la difusión de los iones de oxígeno? ¿Qué tiempo se requerirá a la temperatura más baja?

5-78 Una aleación de Cu-Zn tiene un diámetro de grano inicial de 0.01 mm. La aleación se calienta a varias temperaturas, lo que permite que los granos crezcan. Los tiempos que se requieren para que los granos crezcan a un diámetro de 0.30 mm se muestran abajo.

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)
500	80,000
600	3,000
700	120
800	10
850	3

Determine la energía para activar el crecimiento de los granos. ¿Está correlacionada con la difusión del zinc en el cobre? (*Sugerencia*: Observe que la velocidad es el recíproco del tiempo.)

5-79 ¿Cuáles son las ventajas del uso del prensado en caliente y el prensado isostático en caliente en comparación con el uso de la sinterización normal?

5-80 Por difusión, se une una hoja de oro a una de plata en 1 h a 700°C. A 500°C se requieren 440 h para obtener el mismo grado de unión, y a 300°C, se requieren 1530 años. ¿Cuál es la energía de activación del proceso de unión por difusión? ¿Cuál proceso controla la velocidad del enlazamiento: la difusión del oro o la difusión de la plata? (*Sugerencia*: Observe que la velocidad es el recíproco del tiempo.)

Problemas de diseño

5-81 Se intenta mejorar la resistencia al desgaste de un eje de acero por medio del endurecimiento de su superficie. Este objetivo se puede lograr mediante el incremento del contenido de nitrógeno de una capa superficial externa del acero como resultado de la difusión del nitrógeno. Por ello, se suministrará nitrógeno a partir de un gas externo rico en este elemento a una temperatura alta y constante. El contenido de nitrógeno inicial del acero es de 0.002% en peso, mientras que la concentración superficial se mantendrá en 0.45% en peso. Para que este tratamiento sea eficaz, se debe establecer un contenido de nitrógeno de 0.12% en peso en una posición de 0.45 mm por debajo de la superficie. Diseñe un tratamiento térmico adecuado en términos de tiempo con una temperatura entre 475°C y 625°C. Utilice $D_0 = 3.0 \times 10^{-7}$m^2/s y $Q =$ 76,150 J/mol.

5-82 Diseñe un tanque esférico, con una pared de 20 mm de grosor que asegure que no se perderán más de 50 kg de hidrógeno por año. El tanque, que operará a 500°C, puede fabricarse de níquel, aluminio, cobre o hierro. El coeficiente de difusión del hidrógeno y el costo por kg de cada material disponible se listan a continuación.

Datos de la difusión del problema 5-82

Material	D_0 (m^2/s)	Q (kJ/mol)	Costo ($/kg)
Níquel	5.5×10^{-7}	37.24	9.04
Aluminio	1.6×10^{-5}	43.26	1.32
Cobre	1.1×10^{-6}	39.25	2.43
Hierro (CCCu)	1.2×10^{-7}	15.06	0.33

5-83 Un engranaje de acero que inicialmente contiene 0.10% de C se va a carburizar de tal manera que el contenido de carbono a una profundidad de 0.05 pulg sea de 0.50%. Se puede generar un gas para carburizar la superficie que contenga en cualquier parte de 0.95% a 1.15% de C. Diseñe un tratamiento térmico apropiado de carburización.

5-84 Cuando una válvula colada que contiene cobre y níquel se solidifica bajo condiciones sin equilibrio, la composición de la aleación varía de manera sustancial sobre una distancia de 0.005 cm. Por lo general es posible eliminar esta diferencia en las concentraciones por medio del calentamiento de la aleación durante 8 h a 1200°C; sin embargo, en ocasiones este tratamiento provoca que la aleación comience a fusionarse y se destruya la parte. Diseñe un tratamiento térmico que elimine la no uniformidad sin fusión. Suponga que el costo de operación del horno por hora se duplica por cada incremento de 100°C.

5-85 Suponga que la concentración en la superficie del fósforo que se difunde en silicio es de 10^{27} átomos/m^3. Se necesita diseñar un proceso conocido como etapa de predeposición, de tal manera que la concentración del P (c_1 en la etapa 1) a una profundidad de 0.25 micrómetros sea de 10^{19} átomos/m^3. Suponga que ésta se lleva a cabo a una temperatura de 1000°C y que el coeficiente de difusión del P en Si a esta temperatura es de 2.5×10^{-18} m^2/s. Asuma que el proceso se lleva a cabo durante un tiempo total de 8 minutos. Calcule el perfil de la concentración (es decir, c_1 como una función de la profundidad, lo cual en este caso está dado por la siguiente ecuación). Observe el uso de la función de error complementaria.

$$c_1(x, t_1) = c_s\left[1 - \text{erf}\left(\frac{x}{4Dt}\right)\right]$$

Utilice diferentes valores de x para generar y graficar este perfil de P durante la etapa de predeposición.

Problemas por computadora

5-86 *Cálculo de los coeficientes de difusión*. Edite un programa de cómputo que le pida al usuario que proporcione información de la energía de activación Q y el valor de D_0. También debe pedirle que introduzca un intervalo válido de temperaturas. El programa, cuando se ejecuta, presenta los valores de D como una función de la temperatura en incrementos elegidos por el usuario. El programa debe convertir Q, D_0 y la temperatura en las unidades apropiadas. Por ejemplo, si el usuario elige temperaturas en°F, el programa debe reconocer esto y convertir la temperatura en K. El programa también debe presentar una declaración preventiva acerca de los supuestos estándar que se hicieron. Por ejemplo, debe prevenir al usuario qué efectos de cualquier cambio posible en la estructura cristalina en el intervalo de temperaturas especificado no se deben tomar en cuenta. Compruebe la validez de sus programas utilizando los ejemplos que presenta el libro y otros que pueda haber resuelto mediante una calculadora.

5-87 *Comparación de las velocidades de reacción*. Edite un programa de cómputo que le pida al usuario que introduzca la energía de activación de una reacción química. También debe pedirle que proporcione dos temperaturas a las que deben compararse las velocidades de reacción. Utilizando el valor de la constante de los gases y la energía de activación, el programa debe proporcionar una razón de las velocidades de reacción. También debe tomar en cuenta las distintas unidades de la energía de activación.

5-88 *Tratamiento térmico de carburización*. Edite un programa de cómputo para calcular el tratamiento término de carburización. El programa debe pedirle al usuario que proporcione una entrada para concentrar el carbono en la superficie (c_s) y en el volumen (c_0). El programa también debe pedirle al usuario que proporcione la temperatura y un valor de D (o valores de D_0 y Q, que permitirán que se calcule D). El programa debe proporcionar una salida del perfil de la concentración en forma de tabla. La distancia a la que se determinarán las concentraciones de carbono puede ser proporcionada por el usuario o definidas por la persona que edite el programa, el cual también debe poder manejar el cálculo de los tiempos del tratamiento térmico si el usuario proporciona un nivel de la concentración que se requiere a una profundidad específica. Este programa requiere calcular la función de error. El lenguaje de programación u hoja de cálculo que utilice puede incorporar una función que calcule la función de error. Si este es el caso, utilice esa función. También puede calcular la función de error como la expansión de la siguiente serie:

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}z}\left(1 - \frac{1}{2z^2} - \frac{1 \times 3}{(2z^2)^2} + \frac{1 \times 3 \times 5}{(2z^2)^3} + \cdots\right)$$

o utilizar una aproximación

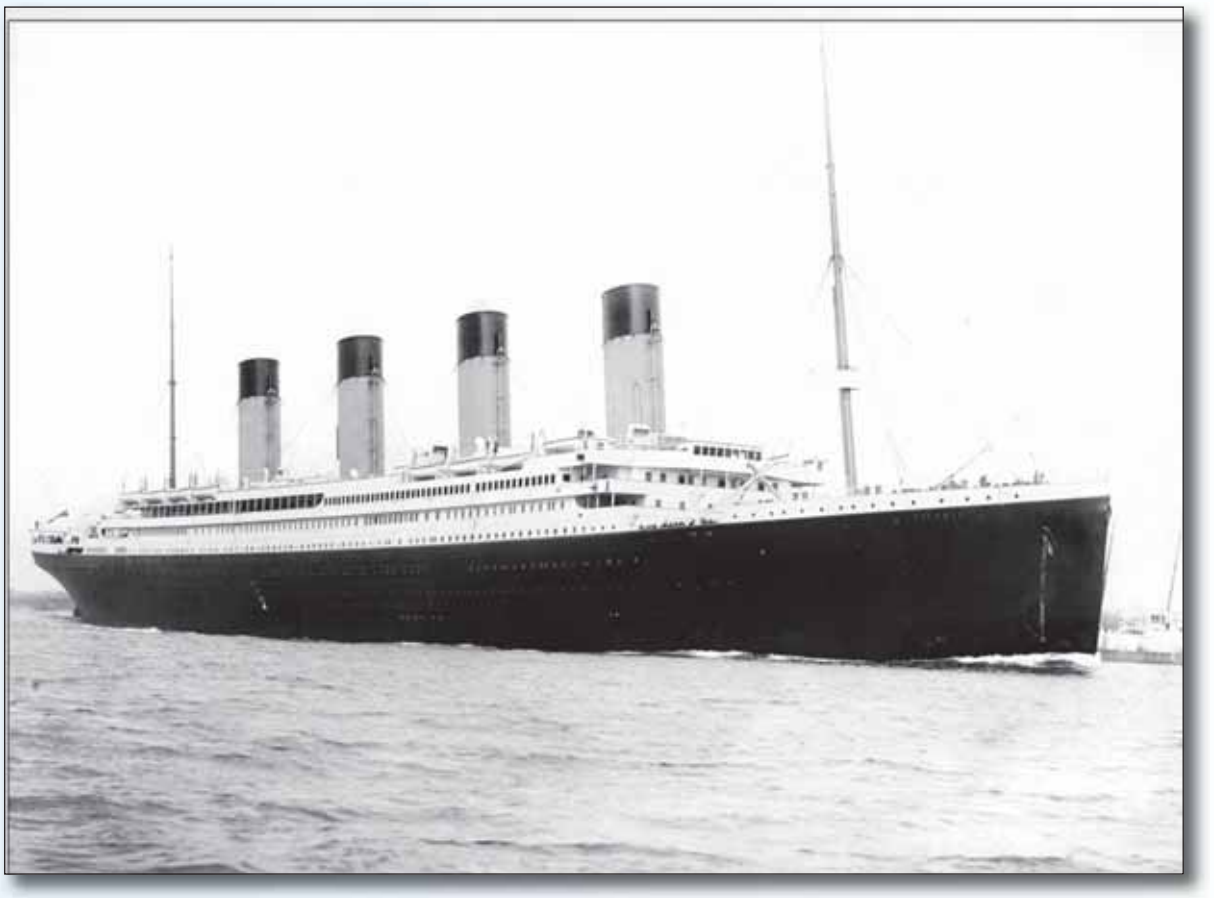
$$\text{erf}(z) = 1 - \left[\left(\frac{1}{\sqrt{\pi}}\right)\frac{e^{-z^2}}{z}\right]$$

En estas ecuaciones, z es el argumento de la función de error. También, en ciertas situaciones, conocerá el valor de la función de error (si se proporcionan todas las concentraciones) y ten-

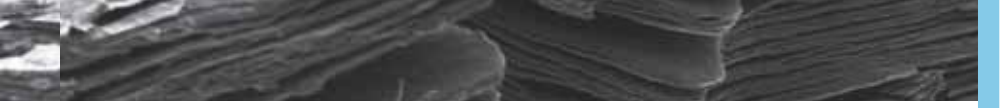
drá que calcular el argumento de la función de error. Esta etapa puede manejarse haciendo que una parte del programa compare los distintos valores del argumento de la función de error y minimizando la diferencia entre el valor de la función de error que requiere y el valor de la función de error que se aproximó.

Problemas Knovel[MR]

K5-1 Compare las permeabilidades de las películas de polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno y tereftalato de polietileno (PET) al dióxido de carbono a temperatura ambiente.



Algunos materiales pueden volverse quebradizos cuando las temperaturas son bajas y/o las velocidades de deformación son altas. La química especial del acero que se utilizó en el *Titanic* y las tensiones asociadas con la fabricación y al resquebrajamiento de este acero cuando se le sometió a temperaturas bajas se han identificado como factores que contribuyeron a la falla del casco del barco. (*John Parrot/Stocktrek Images/Stocktrek Images/Getty Images*.)



CAPÍTULO

6

Propiedades mecánicas: primera parte

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Por qué Silly Putty® puede estirarse una cantidad considerable cuando se jala de manera lenta, pero se parte en dos cuando se jala rápido?*
- *¿Por qué se puede cargar el peso de un camión de bomberos sobre cuatro tazas de café de cerámica, pero los objetos tazas fabricados con ese material tienden a romperse con facilidad cuando se dejan caer al suelo?*
- *¿Cuáles factores relacionados con los materiales desempeñaron una función importante en el hundimiento del* Titanic*?*
- *¿Cuáles factores desempeñaron una función importante en el accidente del transbordador* Challenger *en 1986?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Identificar las características cruciales de una curva de tensión-deformación uniaxial (módulo elástico, límite elástico, resistencia a la tracción, estricción, falla por esfuerzo, falla por deformación, región elástica, región plástica, tenacidad).
- A partir de datos de cargas y desplazamiento, construir una curva de tensión-esfuerzo y calcular la ductilidad de una muestra.
- Calcular el esfuerzo y las deformaciones real e ingenieril, y explicar por qué existen los sistemas de esfuerzo y deformación.
- Predecir la forma en que cambiarán las propiedades mecánicas de los materiales cuando se someten a diferentes tasas de tensión y temperatura.
- Calcular la fuerza y el módulo de flexión de un material sometido a pruebas de flexión.
- Definir la propiedad material de la dureza y explicar cómo se mide con diferentes escalas de longitud.
- Explicar por qué los vidrios metálicos son extraordinariamente fuertes pero quebradizos.

Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de su composición y microestructura. En los capítulos 2, 3 y 4 se aprendió que la composición de un material, la naturaleza del enlace, la estructura cristalina y los defectos tienen una influencia profunda en la resistencia y ductilidad de los materiales metálicos. En este capítulo comenzaremos a evaluar otros factores que afectan las propiedades mecánicas de los materiales, por ejemplo, cómo las temperaturas muy bajas pueden provocar que muchos metales y plásticos se vuelvan quebradizos. Las temperaturas más bajas contribuyeron a que se quebraran los plásticos que se usaron para fabricar los anillos selladores en los cohetes propulsores compactos, que provocaron el accidente del *Challenger* en 1986. En 2003 se perdió el transbordador *Columbia* debido a un impacto de residuos sobre las losetas cerámicas y a la falla de los compuestos carbono-carbono. De manera similar, la química especial del acero que se usó para construir el *Titanic* y los esfuerzos asociados con la fabricación y el resquebrajamiento de este acero cuando fue sometido a temperaturas bajas se han identificado como los factores que contribuyeron a la falla del casco del barco. Algunos investigadores demostraron que remaches débiles y fallas en el diseño también contribuyeron a la catástrofe.

El objetivo principal de este capítulo es introducir los conceptos básicos asociados con las propiedades mecánicas. Se aprenderán términos básicos como dureza, esfuerzo, deformación, deformación elástica y plástica, viscoelasticidad y rapidez o velocidad de deformación. También se repasarán algunos de los procedimientos básicos de prueba que aplican los ingenieros para evaluar muchas de estas propiedades. Estos conceptos se explicarán con base en ilustraciones de aplicaciones en el mundo real.

6-1 Importancia tecnológica

El enfoque principal de muchas de las tecnologías emergentes actuales se concentra en las propiedades mecánicas de los materiales que se usan. Por ejemplo, en la fabricación de aviones, las aleaciones de aluminio o los compuestos reforzados con carbono que se emplean para fabricar los componentes de las aeronaves deben ser ligeros, resistentes y capaces de soportar la carga mecánica cíclica por largos y predecibles periodos. Los aceros que se usan en la construcción de estructuras como edificios y puentes deben tener la resistencia adecuada para que estas estructuras puedan construirse sin comprometer la seguridad. Los plásticos que se emplean para fabricar tuberías, válvulas, baldosas y similares también deben poseer una resistencia mecánica adecuada. Los materiales como el grafito pirolítico o las aleaciones de tungsteno, cromo y cobalto que se usan para elaborar válvulas cardiacas prostéticas, no deben fallar. De manera similar, el desempeño de las pelotas de beisbol, los bates de críquet, las raquetas de tenis, los palos de golf, los esquíes y otro equipo deportivo no sólo dependen de la resistencia y peso de los materiales empleados, sino también de su capacidad para funcionar bajo una carga de "impacto". La importancia de las propiedades mecánicas es fácil de apreciar en varias de estas aplicaciones de "soporte de carga".

En muchas otras aplicaciones, las propiedades mecánicas de los materiales también desempeñan un papel importante, a pesar de que la función primaria sea eléctrica, magnética, óptica o biológica. Por ejemplo, una fibra óptica debe poseer cierto nivel de resistencia para soportar los esfuerzos que encuentra en su aplicación. Una aleación de titanio biocompatible que se usa para realizar un implante óseo debe tener la resistencia y la dureza suficientes para sobrevivir sin fallar en el cuerpo humano durante muchos años. Un recubrimiento sobre los lentes ópticos debe resistir la abrasión mecánica. Una aleación de aluminio o un sustrato vidrio-cerámico que se emplea como base para fabricar discos duros magnéticos debe poseer la suficiente resistencia mecánica para que no se rompa o fisure durante la operación que requiere la rotación a altas velocidades. Asimismo, similar, los empaques electrónicos que se usan para encapsular chips semiconductores y las estructuras de película delgada que se colocan sobre el chip semiconductor deben ser capaces de soportar los esfuerzos que encontrarán en diversas aplicaciones, al igual que los que padecieron durante el calentamiento y enfriamiento de los dispositivos electrónicos. La fortaleza mecánica de los dispositivos pequeños que emplean nanotecnología también es importante. Los vidrios flotados que se emplean en las industrias automotriz y de la construcción deben poseer la resistencia suficiente. Numerosos componentes que se diseñan con plásticos, metales y cerámicas no sólo deben poseer la dureza y resistencia adecuadas a temperatura ambiente, sino también a temperaturas relativamente altas y bajas.

Para construir soportes de cargas, se seleccionan los materiales de ingeniería, luego de comparar sus propiedades mecánicas con las especificaciones de diseño y las condiciones de servicio que requiere el componente. La primera etapa del proceso de selección requiere un análisis de la aplicación del material para determinar sus características más importantes. ¿Debe ser resistente, rígido o dúctil? ¿Estará sujeto a una tarea que involucre un gran esfuerzo o una fuerza intensa repentina, un esfuerzo alto a una alta temperatura, esfuerzos cíclicos, condiciones corrosivas o abrasivas? Una vez que se conocen las propiedades que se requieren, se puede realizar una selección preliminar del material apropiado mediante la búsqueda en varias bases de datos. Sin embargo, se debe conocer cómo se determinaron las propiedades que se presentan en el manual, conocer qué significan las propiedades y comprender que las propiedades incluidas en la lista se obtienen a partir de pruebas idealizadas que pueden no ser adecuadas para las condiciones que exige la ingeniería en el mundo real. Los materiales con la misma composición química nominal y otras propiedades pueden mostrar propiedades mecánicas significativamente distintas, dictaminadas por sus microestructuras. Además, los cambios de temperatura; la naturaleza cíclica de los esfuerzos aplicados; los cambios químicos debidos a la oxidación, corrosión o erosión; las modificaciones microestructurales debidas a la temperatura, el efecto de los defectos posibles introducidos durante las operaciones de maquinado (por ejemplo, rectificado, soldado, corte, etc.) u otros factores también pueden tener un efecto trascendental en el comportamiento mecánico de los materiales.

También deben comprenderse las propiedades mecánicas de los materiales para que éstos puedan procesarse en formas útiles con base en técnicas de procesamiento de materiales. El **procesamiento de deformación** requiere comprender de manera detallada las propiedades mecánicas de los materiales a distintas temperaturas y condiciones de carga. También se debe comprender cómo y por qué el procesamiento de los materiales puede modificar las propiedades de éstos; por ejemplo, hacer un metal más resistente o más débil de lo que era antes del procesamiento.

En las siguientes secciones se definen los términos que se utilizan para describir las propiedades mecánicas de los materiales de ingeniería. Además, se explican las distintas pruebas que se aplican para determinar las propiedades mecánicas de los materiales.

6-2 Terminología de las propiedades mecánicas

Existen distintos tipos de fuerzas o "esfuerzos" que se encuentran cuando se estudian las propiedades mecánicas de los materiales. En general, el esfuerzo se define como la fuerza que actúa por unidad de área sobre la que se aplica la fuerza. En la figura 6-1*a*) se ilustran los esfuerzos de tensión, compresión y corte. La **deformación unitaria** se define como el cambio en dimensión por unidad de longitud. Por lo general, el esfuerzo se expresa en psi (libras por pulgada cuadrada) o en Pa (pascales o newtons por metro cuadrado). La deformación unitaria no tiene dimensiones y con frecuencia se expresa como pulg/pulg o cm/cm.

Los esfuerzos de tensión y de compresión son esfuerzos normales. Estamos frente a un esfuerzo normal cuando la fuerza que se aplica actúa de manera perpendicular al área de interés. La tensión ocasiona una elongación en la dirección de la fuerza aplicada, mientras que la compresión provoca un acortamiento. Se presenta un esfuerzo cortante cuando la fuerza que se aplica actúa en una dirección paralela al área de interés. Muchas aplicaciones de soporte de carga involucran esfuerzos de tensión o de compresión. Con frecuencia, los esfuerzos cortantes se encuentran en el procesamiento de materiales que utilizan técnicas como la extrusión de polímeros, pero también se hallan en aplicaciones estructurales. Observe que incluso un esfuerzo de tensión simple que se aplica a lo largo de una dirección provocará un esfuerzo cortante en las demás direcciones (por ejemplo, vea la ley de Schmid, capítulo 4).

La **deformación elástica** se define como la deformación recuperable por completo que resulta a partir de que se aplica un esfuerzo. La deformación es "elástica" si se desarrolla de manera instantánea (es decir, que ocurre tan pronto como se aplica la fuerza), permanece mientras se aplique el esfuerzo y se recupera cuando éste se retira. Un material sujeto a una deformación elástica no muestra ninguna deformación permanente (es decir, regresa a su forma original después de que se elimina la fuerza o esfuerzo). Considere el estiramiento de un resorte metálico rígido por un pequeño tiempo para después soltarlo. Si el resorte vuelve de inmediato a sus dimensiones originales, la deformación desarrollada en el resorte fue elástica.

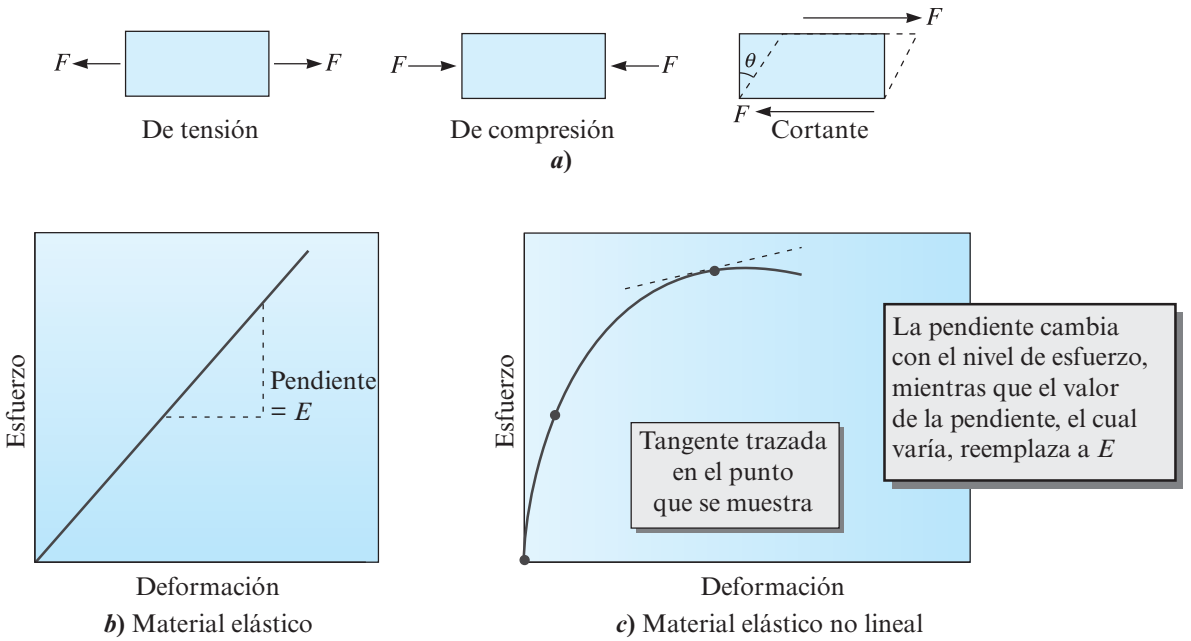


Figura 6-1 *a*) Esfuerzos de tensión, compresión y corte. *F* es la fuerza aplicada. *b*) Ilustración que muestra cómo se define el módulo de Young en el caso de un material elástico. *c*) En el caso de los materiales no lineales, se utiliza la pendiente de una tangente como una cantidad variable que reemplaza al módulo de Young.

En muchos materiales, el esfuerzo elástico y la deformación elástica se relacionan linealmente. La pendiente de una de curva de esfuerzo de tensión-deformación en el régimen lineal define el **módulo de Young** o **módulo de elasticidad** (*E*) de un material [figura 6-1*b*)]. Las unidades de *E* se miden en libras por pulgada cuadrada (psi) o en pascales (Pa) (las mismas que las del esfuerzo). Se observan deformaciones elásticas grandes en los **elastómeros** (por ejemplo, el hule natural, las siliconas), en cuyos casos la relación entre la deformación elástica y el esfuerzo es no lineal. En los elastómeros, la gran deformación elástica se relaciona con el enrollado y desenrollado de moléculas parecidas a resortes (capítulo 16). Cuando se trabaja con estos materiales, se utiliza la pendiente de la tangente en cualquier valor dado de esfuerzo o deformación y se considera que es una cantidad variable que reemplaza al módulo de Young [figura 6-1*c*)]. El **módulo cortante** (*G*) se define como la pendiente de la parte lineal de la curva esfuerzo cortante-deformación cortante.

A la **deformación plástica** o permanente de un material se le conoce como **deformación plástica**. En este caso, cuando se elimina el esfuerzo, el material *no* vuelve a su forma original. ¡Una abolladura en un automóvil es una deformación plástica! Observe que la palabra "plástica" no se refiere aquí a la deformación de un material plástico (polimérico), sino a la deformación permanente de cualquier material.

La rapidez a la que se desarrolla la deformación de un material se define como la **rapidez de deformación**. Las unidades de la rapidez de deformación son s^{-1}. Más adelante en el capítulo aprenderá que la rapidez a la que un material se deforma es importante desde la perspectiva de sus propiedades mecánicas. Muchos materiales considerados como dúctiles se comportan como sólidos quebradizos cuando su rapidez de deformación es alta. El Silly Putty® (un polímero de silicona) es un ejemplo de tal material. Cuando la rapidez de deformación es baja, el Silly Putty® puede mostrar una ductilidad significativa. Cuando se estira de manera rápida (a rapidez de deformación alta), no se permite el desenredado ni la elongación de las moléculas grandes de polímero y, por lo tanto, el material se parte en dos. Cuando los materiales se someten a alta rapidez de deformación, este tipo de carga se conoce como **carga de impacto**.

Un **material viscoso** es aquel en el que se desarrolla la deformación durante un tiempo y el material no vuelve a su forma original después de que se elimina el esfuerzo. El desarrollo de la

deformación toma tiempo y no está en fase con el esfuerzo aplicado. También, el material permanecerá deformado cuando se elimine el esfuerzo aplicado (es decir, la deformación será plástica). Un material **viscoelástico** (o **anelástico**) puede concebirse como un material con una respuesta entre la de un material viscoso y uno elástico. Por lo general, el término "anelástico" se utiliza para los metales, mientras que el término "viscoelástico" por lo general se asocia con los materiales poliméricos. Numerosos plásticos (sólidos y fundidos) son viscoelásticos. Un ejemplo común de un material viscoelástico es el Silly Putty®.

En el caso de un material viscoelástico, el desarrollo de una deformación permanente es similar al de un material viscoso. A diferencia de este último, cuando se elimina el esfuerzo aplicado, parte de la deformación del material se recuperará después de un tiempo. La recuperación de la deformación se refiere a un cambio en la forma de un material después de que se elimina el esfuerzo que provoca la deformación. En la figura 6-2 se muestra una descripción cualitativa del desarrollo de la deformación como una función del tiempo en relación con una fuerza aplicada en materiales elásticos, viscosos y viscoelásticos. En los materiales viscoelásticos que se mantienen bajo una deformación constante, si se espera, el nivel de la deformación disminuye en un cierto periodo. A esto se le conoce como **relajación del esfuerzo**. La recuperación de la deformidad y la relajación del esfuerzo son términos distintos y no deben confundirse. Un ejemplo común de relajación del esfuerzo lo proporcionan las cuerdas de nailon en una raqueta de tenis. Se sabe que el nivel de esfuerzo, o la "tensión", como le llaman los jugadores, disminuye con el tiempo.

En las siguientes secciones se explican las diferentes propiedades mecánicas de los materiales sólidos y algunos de los métodos de prueba para evaluarlas.

6-3 Prueba de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación

La prueba o ensayo de tensión es de uso recurrente, dado que las propiedades que se obtienen pueden aplicarse al diseño de distintos componentes. Dicha prueba mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Por lo general, la rapidez de deformación en una prueba de tensión es pequeña (10^{-4} a 10^{-2} s^{-1}). En la figura 6-3 se muestra una configuración de la prueba; un espécimen común tiene un diámetro de 12.83 mm y una longitud calibrada de 50.8 mm. El espécimen se coloca en la máquina de pruebas y se aplica una fuerza F, llamada **carga**. Con frecuencia se usa una máquina universal de prueba en la que pueden llevarse a cabo pruebas de tensión y compresión. Además, se recurre a un **deformímetro** o **extensómetro** para medir la cantidad que se estira el espécimen entre las marcas calibradas cuando se aplica la fuerza. Por lo tanto, se mide el cambio en longitud del espécimen (Δl) con respecto a la longitud original (l_0). La información que concierne a la resistencia, al módulo de Young, y a la ductilidad de un material puede obtenerse a partir de tal prueba de tensión. Por lo general, se realizan pruebas de tensión sobre metales, aleaciones y plásticos. Estas pruebas pueden utilizarse para cerámicas, pero no son muy difundidas, debido a que la muestra puede fracturarse cuando se alinea. La siguiente explicación se aplica principalmente a la prueba de tensión de metales y aleaciones. También se explicará de manera breve el comportamiento esfuerzo-deformación de los polímeros.

La figura 6-4 muestra de manera *cualitativa* las curvas de esfuerzo-deformación unitaria de un *a*) metal, *b*) un material termoplástico, *c*) un elastómero y *d*) una cerámica (o vidrio) comunes, todos bajo velocidades de deformación relativamente pequeñas. Las escalas en esta figura son cualitativas y distintas según cada material. En la práctica, la magnitud real de los esfuerzos y deformaciones es muy diferente. Se supone que la temperatura del material termoplástico está por encima de su **temperatura de transición vítrea** (T_v). Se supone que la temperatura del metal está a temperatura ambiente. Los materiales metálicos y termoplásticos muestran una zona elástica inicial seguida por una zona plástica no lineal. También se incluye una curva separada para los elastómeros (por ejemplo, caucho y siliconas) dado que el comportamiento de estos materiales es distinto del de otros materiales poliméricos. En el caso de los elastómeros, una gran parte de la deformación es elástica y no lineal. Por otro lado, las cerámicas y los vidrios a temperatura ambiente sólo muestran una zona elástica lineal y casi ninguna deformación plástica a temperatura ambiente.

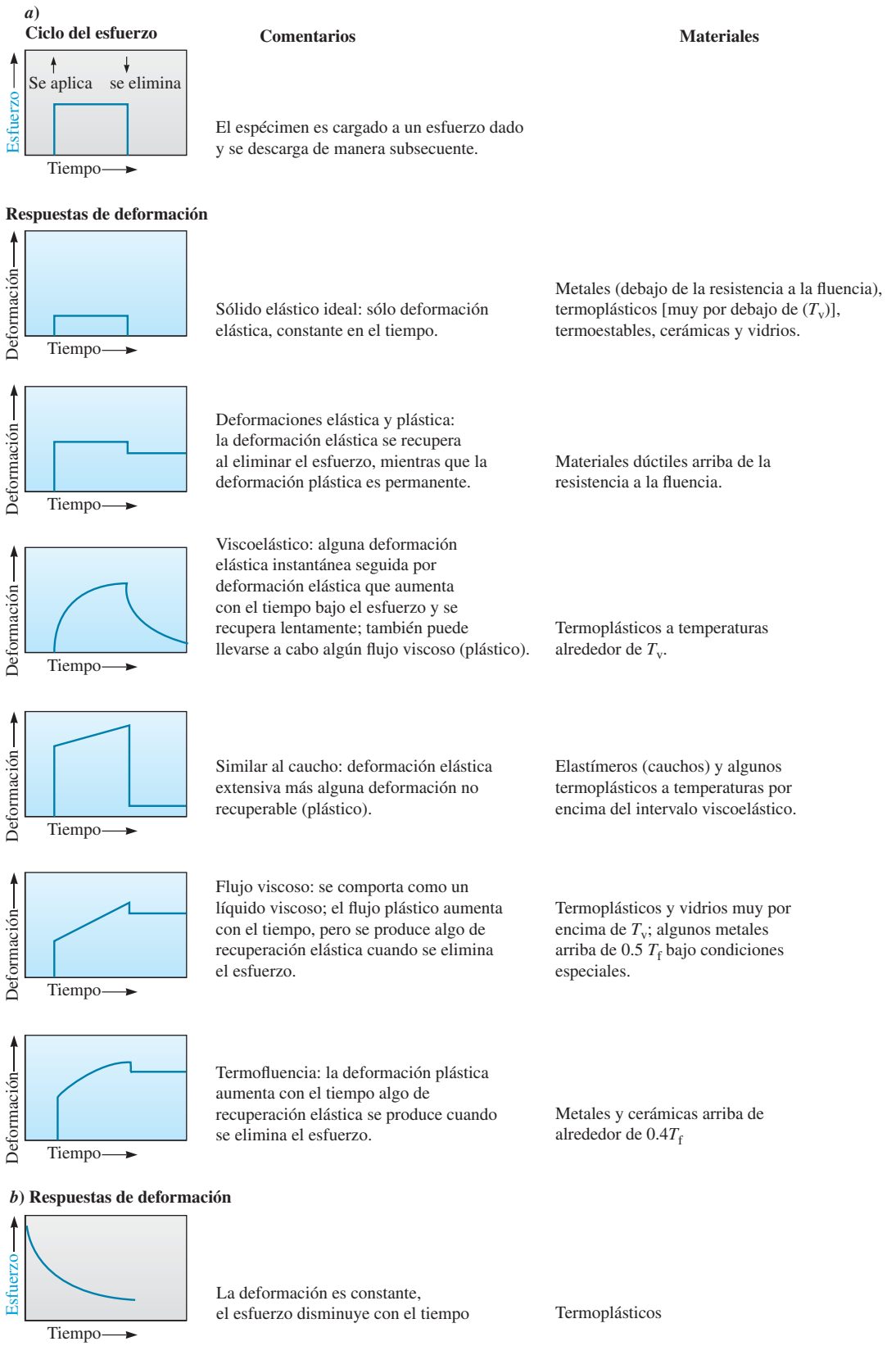


Figura 6-2 *a*) Varios tipos de respuesta de la deformación a un esfuerzo impuesto, donde T_v = temperatura de transición de vidrio y T_f = punto de fusión. [*Basada en* Materials Principles and Practice, *de C. Newey y G. Weaver* (*eds.*), *1991.*] *b*) Relajación de esfuerzo en un material viscoelástico. *Observe que el eje vertical es el esfuerzo*. La deformación es constante.

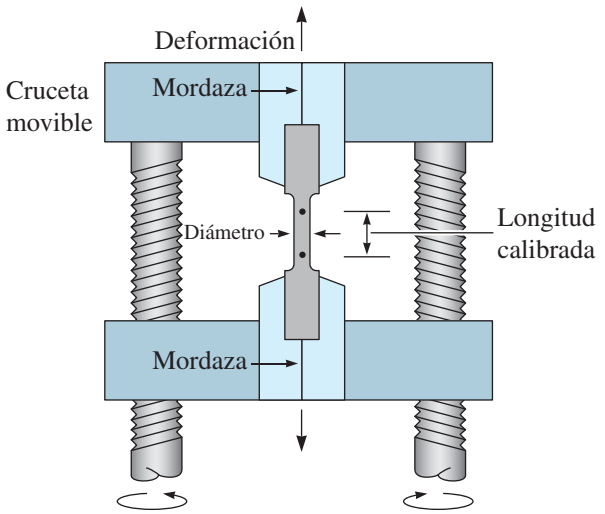


Figura 6-3 Se aplica una fuerza unidireccional a un espécimen en la prueba de tensión por medio de la cruceta movible. El movimiento de la cruceta puede llevarse a cabo con el uso de tornillos o un mecanismo hidráulico.

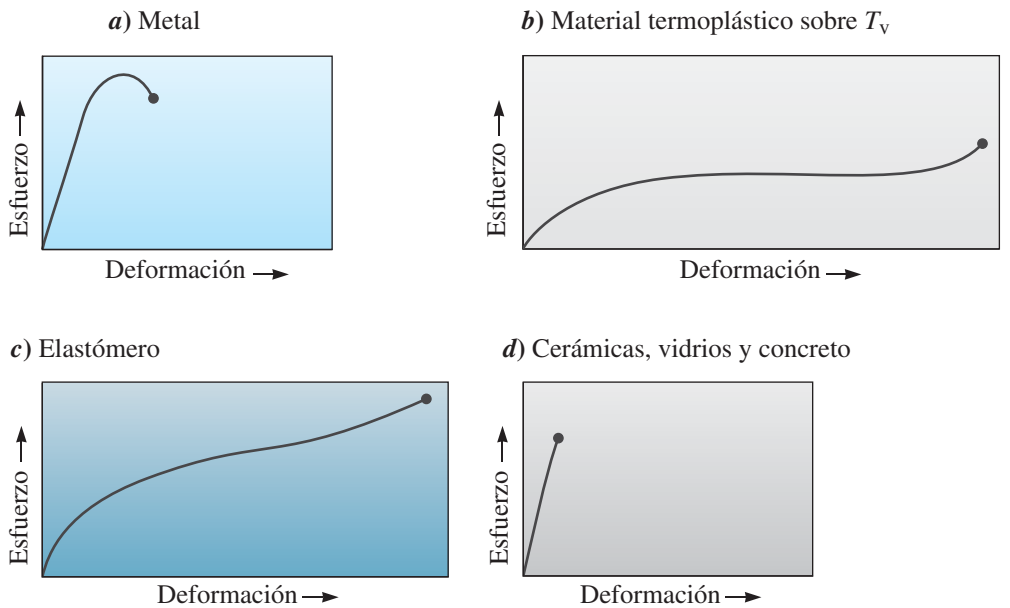


Figura 6-4 Curvas de esfuerzo-deformación bajo tensión de distintos materiales. Observe que estas gráficas son *cualitativas*. Las magnitudes de los esfuerzos y las deformaciones no deben compararse. Las fallas ocurren en los puntos que señalan los círculos.

Cuando se lleva a cabo una prueba de tensión, la información que se registra incluye la carga o fuerza como una función del cambio en longitud (Δl), como se muestra en la tabla 6-1 en el caso de una barra de prueba de aleación de aluminio. Después, esta información se convierte en esfuerzo y deformación. Posteriormente se analiza la curva esfuerzo-deformación unitaria para inferir las propiedades de los materiales (por ejemplo, el módulo de Young, la resistencia a la fluencia, etcétera).

Esfuerzo y deformación ingenieriles

Los resultados de una sola prueba se aplican a todos los tamaños y secciones transversales de los especímenes de un material dado si se convierte la fuerza en esfuerzo y la distancia entre las marcas calibradas en deformación. Si se utilizan la fuerza y el desplazamiento, el resultado dependerá en la muestra geométrica (por ejemplo, los especímenes grandes requieren fuerzas superiores y sufren elongaciones mayores que los especímenes más pequeños del mismo material). Los resultados del esfuerzo y la tensión son los mismos

Tabla 6-1 Resultados de una prueba de tensión de una barra de prueba de aleación sin aluminio de 12.83 mm de diámetro, con una longitud inicial (l_0) = 50.8 mm.

		Calculado	
Carga (kN)	**Cambio de longitud (mm)**	**Esfuerzo (kPa)**	**Deformación (mm/mm)**
0	0.000	0	0
4.448	0.0254	34.43	0.0005
13.344	0.0762	103.3	0.0015
22.24	0.127	172.1	0.0025
31.136	0.178	241.0	0.0035
33.36	0.762	258.2	0.0150
35.14	2.032	272	0.0400
35.584 (carga máxima)	3.05	275.4	0.0600
35.36	4.06	273.7	0.0800
33.805 (fractura)	5.21	261.6	0.1025

cuando los materiales son iguales sin que importe el tamaño del espécimen. El **esfuerzo ingenieril** y la **deformación ingenieril** se definen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = S = \frac{F}{A_0} \tag{6-1}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = e = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{6-2}$$

donde A_0 es el área de la sección transversal *original* del espécimen antes de que comience la prueba, l_0 es la distancia original entre las marcas calibradas y Δl el cambio de longitud después de que se aplica la fuerza F. En la tabla 6-1 se incluyen las conversiones de la carga y la longitud de la muestra al esfuerzo y la deformación. Se utiliza la curva esfuerzo-deformación (figura 6-5) para registrar los resultados de una prueba de tensión.

Unidades

Se utilizan diversas unidades para reportar los resultados de la prueba de tensión. Las unidades más comunes para medir el esfuerzo son libras por pulgada cuadrada (psi) y megapascales (MPa). Las unidades para medir la deformación incluyen pulgada/pulgada, milímetro/milímetro y metro/metro y, por lo tanto, con frecuencia la deformación se escribe como sin unidades. En la tabla 6-2 se resumen los factores de conversión del esfuerzo. Dado que la deformación es adimensional, no se requieren factores de conversión para modificar el sistema de unidades.

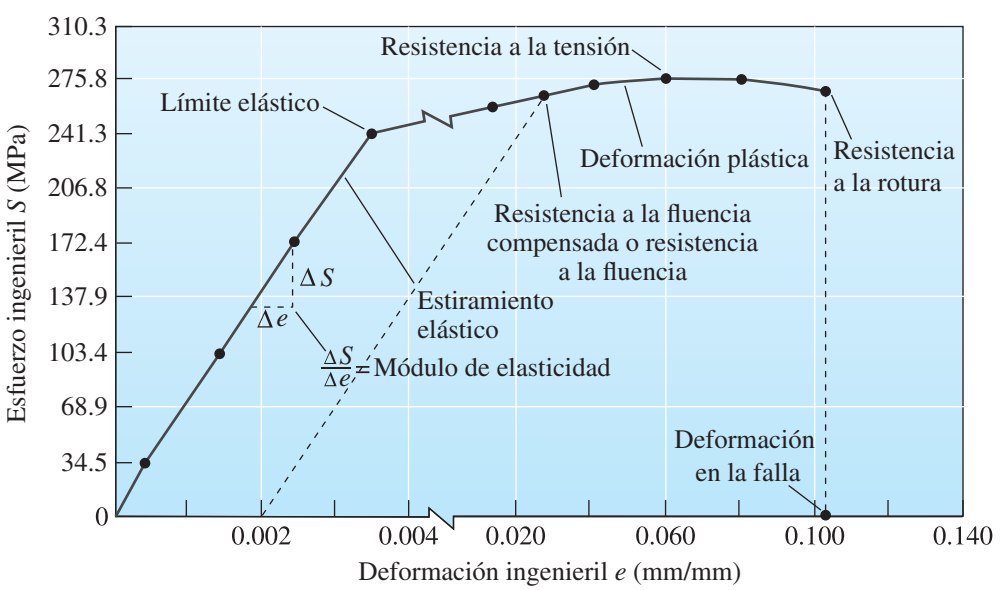


Figura 6-5 Curva esfuerzo-deformación ingenieriles de una aleación de aluminio a partir de la tabla 6-1.

Tabla 6-2 Unidades y factores de conversión

1 libra (lb) = 4.448 newtons (N)
1 psi = libra por pulgada cuadrada
1 MPa = megapascal= meganewtons por metro cuadrado (MN/m^2)
= newtons por milímetro cuadrado (N/mm^2)=10^6 Pa
1 GPa= 1,000 MPa= gigapascal
1ksi = 1,000 psi= 6.895 MPa
1 psi = 0.006895 MPa
1 MPa = 0.145 ksi = 145 psi

Ejemplo 6-1 *Prueba de tensión de una aleación de aluminio*

Convierta los datos del cambio de longitud de la tabla 6-1 a esfuerzo y deformación ingenieriles y grafique una curva de esfuerzo-deformación.

SOLUCIÓN

Para la carga de 1,000 lb:

$$S = \frac{F}{A_0} = \frac{4.448 \times 10^3 \text{ N}}{(\pi/4)(12.83 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 34.425 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.0254 \text{ mm}}{50.8 \text{ mm}} = 0.0005 \text{ mm/mm}$$

En la tabla 6-1 se dan los resultados de cálculos similares para cada una de las cargas restantes y se grafican en la figura 6-5.

Ejemplo 6-2 *Diseño de una barra de suspensión*

Una barra de aluminio debe soportar una fuerza aplicada de 200 kN. En la figura 6-5 se muestra la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles de la aleación de aluminio que se usará. A fin de que la seguridad sea infalible, el esfuerzo máximo permisible sobre la barra se limita a 172.37 MPa, es decir, se encuentra por debajo de la resistencia a la fluencia del aluminio. La barra debe ser de por lo menos 3.81 m de largo, pero no debe deformarse de manera elástica más de 6.35 mm cuando se aplique la fuerza. Diseñe una barra apropiada.

SOLUCIÓN

A partir de la definición de la deformación ingenieril,

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

En el caso de una barra que es de 1.81 m de largo, la deformación que corresponde a una extensión de 6.35 mm es

$$e = \frac{6.35 \text{ mm}}{3.81 \times 10^3 \text{ mm}} = 0.00167$$

Con base en la figura 6-5, esta deformación es puramente elástica y el valor del esfuerzo correspondiente es de aproximadamente 17,000 psi (117.2 MPa), el cual es inferior al límite de 172.37 MPa. Se utiliza la definición de esfuerzo ingenieril para calcular el área de la sección transversal que requiere la barra:

$$S = \frac{F}{A_0}$$

Observe que el esfuerzo no debe exceder de 172.37MPa, o en consecuencia, la deflexión será mayor a 6.35mm: Reordenando,

$$A_0 = \frac{F}{S} = \frac{200 \times 10^3 \text{ N}}{117.2 \times 10^6 \text{ Pa}} = 1.71 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

La barra puede producirse de varias formas, siempre que el área de la sección transversal sea de $1.71 \times 10^{-3}\text{m}^2$. En el caso de una sección transversal redonda, el diámetro mínimo para asegurar que el esfuerzo no sea muy alto es

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 1.71 \times 10^{-3}\,\text{m}^2 \quad \text{o} \quad d = 0.0466\ \text{m o } 46.6\ \text{mm}$$

Por lo tanto, un diseño posible que cumple todos los criterios especificados es una barra de suspensión de 1.81 m de largo con un diámetro de 46.6 mm.

6-4 Propiedades que se descubren a partir de la prueba de tensión

Resistencia a la fluencia

Cuando se le aplica un esfuerzo a un material, éste muestra, al inicio, una deformación elástica. La deformación que desarrolla se recupera por completo cuando se elimina el esfuerzo aplicado. A medida que aumenta dicho esfuerzo, el material "fluye" ante el esfuerzo aplicado y se deforma de maneras elástica y plástica. El valor del esfuerzo crítico necesario para iniciar la deformación plástica se conoce como **límite elástico** del material. En los materiales metálicos, por lo general es el esfuerzo que se requiere para que se inicie el movimiento de las dislocaciones, o deslizamiento. En el caso de los materiales poliméricos, este esfuerzo corresponde al desenredado de las cadenas de las moléculas de polímero o al deslizamiento de las cadenas entre sí. El **límite proporcional** se define como el nivel de esfuerzo sobre el cual la relación entre el esfuerzo y la deformación es no lineal.

En la mayoría de los materiales, el límite elástico y el límite proporcional están bastante cercanos; sin embargo, ni los valores del límite elástico ni del proporcional pueden determinarse con precisión. Los valores medidos dependen de la sensibilidad del equipo que se utilice. Por lo tanto, se definen a un **valor de deformación compensado** (por lo general, pero no siempre, de 0.002 o 0.2%). Después se traza una línea que comienza con el valor de deformación compensado y se traza una línea paralela a la parte lineal de la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles. El valor del esfuerzo que corresponde a la intersección de esta línea y la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles se define como la **resistencia a la fluencia compensada**, también enunciada con frecuencia como la **resistencia a la fluencia**. La resistencia a la fluencia compensada a 0.2% del hierro colado gris es de 40,000 psi, como se muestra en la figura 6-6*a*). Por lo general, los ingenieros prefieren utilizar la resistencia a la fluencia compensada para propósitos de diseño, debido a que puede determinarse de manera confiable.

En el caso de algunos materiales, la transición de la deformación elástica al flujo plástico es bastante abrupta. A esta transición se le conoce como **fenómeno del punto de fluencia**. En estos

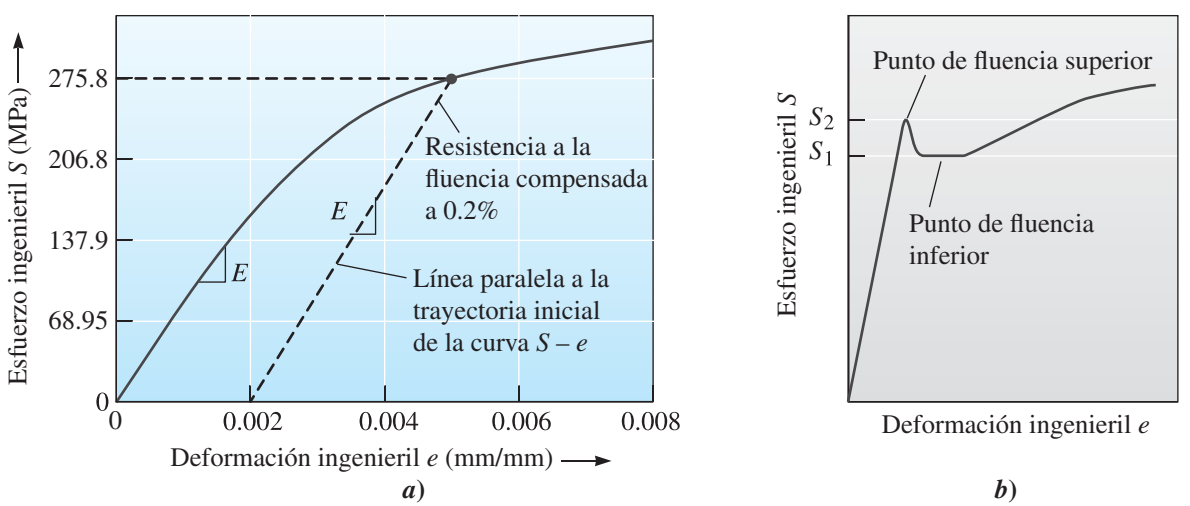


Figura 6-6 *a*) Determinación de la resistencia a la fluencia compensada a 0.2% y *b*) comportamiento del punto de fluencia superior e inferior en un acero al bajo carbono.

materiales, a medida que comienza la deformación plástica, el valor del esfuerzo cae primero del *punto de fluencia superior* (S_2) [figura 6-6*b*)]. El valor del esfuerzo oscila después alrededor de un valor promedio definido como el *punto de fluencia inferior* (S_1). En el caso de estos materiales, la resistencia a la fluencia por lo general se define a partir de la deformación compensada a 0.2%.

La curva de esfuerzo-deformación de ciertos aceros al bajo carbono muestra el fenómeno de punto de fluencia [figura 6-6*b*)]. Se espera que el material se deforme de manera plástica ante el esfuerzo S_1; sin embargo, los átomos intersticiales pequeños aglomerados alrededor de las dislocaciones interfieren con el deslizamiento y elevan el punto de fluencia a S_2. Sólo después de que se aplica el esfuerzo mayor S_2 las dislocaciones se deslizan. Después de que comienza el deslizamiento a S_2, las dislocaciones se alejan de las aglomeraciones de átomos pequeños y continúan moviéndose muy rápido ante el esfuerzo más bajo S_1.

Cuando se diseñan partes para aplicaciones de soporte de carga, se prefiere que haya poca o ninguna deformación plástica. Como resultado, se debe seleccionar un material tal que el esfuerzo del diseño sea considerablemente menor que la resistencia a la fluencia a la temperatura a la que se usará el material. También se puede hacer la sección transversal del componente más grande para que la fuerza que se aplica produzca un esfuerzo que estará muy por debajo de la resistencia a la fluencia. Por otro lado, cuando se desea moldear materiales en componentes (por ejemplo, tomar una hoja de acero y formar el chasis de un automóvil), se deben aplicar esfuerzos que estarán muy por encima de la resistencia a la fluencia.

Resistencia a la tensión

El esfuerzo que se obtiene en la fuerza aplicada más alta es la **resistencia a la tensión** (S_{rt}), la cual es el esfuerzo máximo en la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles. Este valor también se conoce como **resistencia máxima a la tracción**. En muchos materiales dúctiles, la deformación no permanece uniforme. En algún punto, una región se deforma más que las otras y ocurre un gran decrecimiento local en el área de la sección transversal (figura 6-7). A esta región deformada de manera local se le llama "cuello". A este fenómeno se le conoce como **estricción** (rebajo). Debido a que el área de la sección transversal se empequeñece en este punto, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación y el esfuerzo ingenieriles, calculado a partir del área *original* A_0, disminuyen. La resistencia a la tensión es el esfuerzo al que comienza la estricción en los metales dúctiles. En la prueba de compresión los materiales se abultarán; por lo tanto, la estricción sólo se observa en una prueba de tensión.

La figura 6-8 muestra los valores comunes de la resistencia a la fluencia de varios materiales de ingeniería. Los metales ultrapuros tienen una resistencia a la fluencia de $\sim 1 - 10$ MPa. Por otro lado, las aleaciones muestran una resistencia mayor a la fluencia. El endurecimiento de las aleaciones se logra a través de distintos mecanismos descritos con anterioridad (por ejemplo, el tamaño del grano, la formación de soluciones sólidas, el endurecimiento por deformación, etc.). Por lo general, la resistencia a la fluencia de un metal o una aleación en particular es la misma en los casos de la tensión y la compresión. Por lo general, la resistencia a la fluencia de los plásticos y elastómeros es menor que la de los metales y las aleaciones, de hasta alrededor de 10-100 MPa. Los

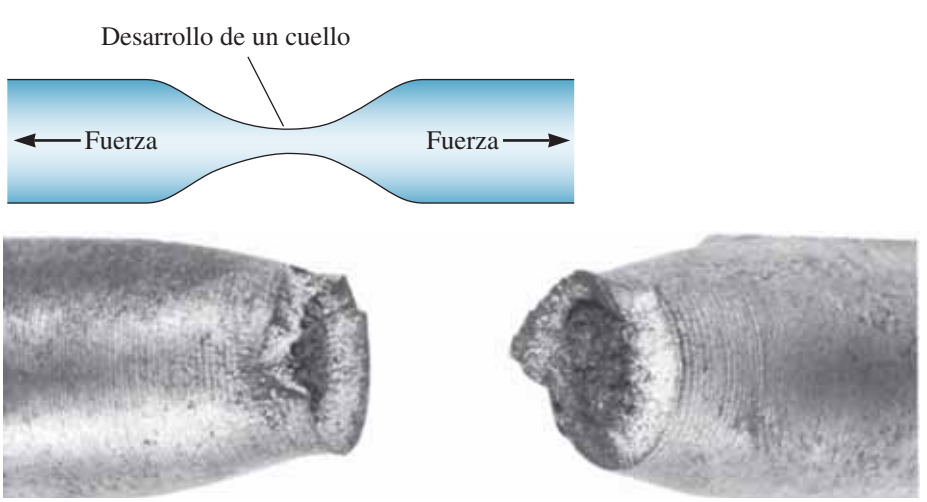


Figura 6-7 La deformación localizada de un material dúctil durante una prueba de tensión produce una región de estricción. La micrografía muestra una región de estricción en una muestra fracturada. (*Reimpreso por cortesía de Don Askeland.*)

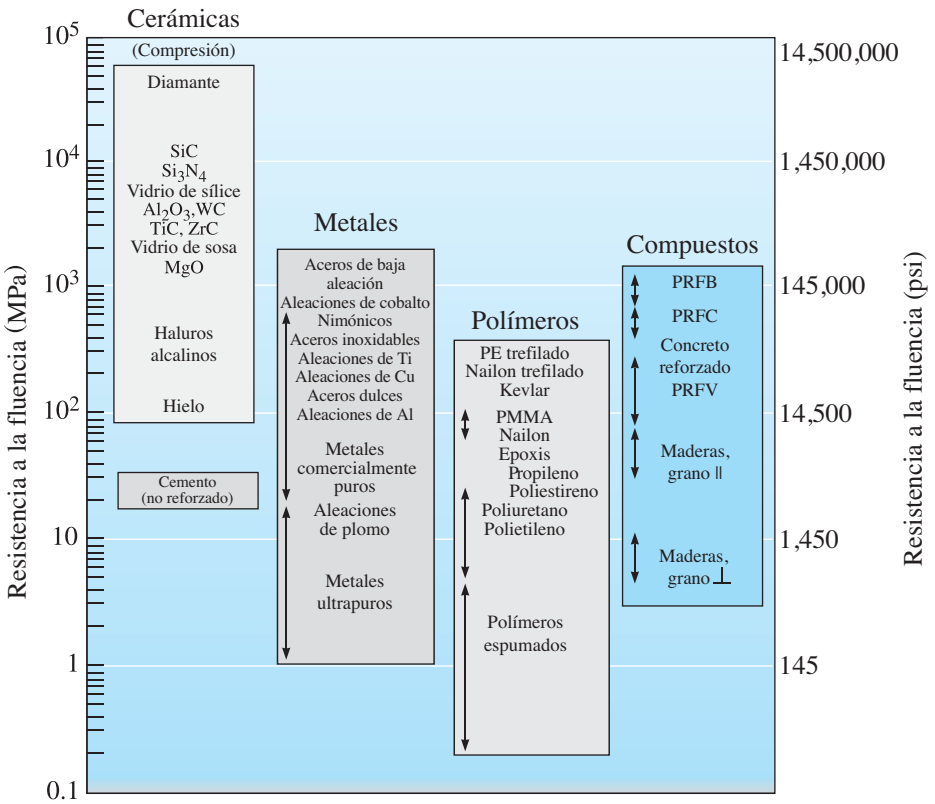


Figura 6-8 Valores comunes de la resistencia a la fluencia comunes para distintos materiales de ingeniería. Observe que los valores que se muestran están en MPa y psi. (*Basado en* Engineering Materials I, *segunda edición, M. F. Ashby y D. R. H. Jones, Elsevier, 1996*.)

valores de las cerámicas (figura 6-8) corresponden a la resistencia de compresión (obtenida utilizando una prueba de dureza). La resistencia a la tensión de la mayoría de las cerámicas es mucho menor (~100-200 MPa). La resistencia a la tensión de los vidrios es de alrededor de ~70 MPa y depende de las fisuras en la superficie.

Propiedades elásticas

El módulo de elasticidad, o módulo de Young (E), es la pendiente de la curva de esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. A esta relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica se le conoce como **ley de Hooke**:

$$E = \frac{S}{e} \tag{6-3}$$

El módulo se relaciona estrechamente con las energías de unión de los átomos (figura 2-18). Una pendiente pronunciada en la gráfica fuerza-distancia en el espaciado de equilibrio (figura 2-19) indica que se requieren grandes fuerzas para separar los átomos y provocar que el material se estire de manera elástica. Por lo tanto, el material tiene un módulo de elasticidad alto. Las fuerzas de unión, y por lo tanto el módulo de elasticidad, por lo general son mayores en el caso de los materiales con puntos de fusión altos (tabla 6-3). En los materiales metálicos, el módulo de elasticidad se considera una propiedad *insensible* a la microestructura, dado que el valor es dominado por la rigidez de los enlaces atómicos. El tamaño de los granos u otras características microestructurales no tienen un gran efecto sobre el módulo de Young. Observe que este módulo depende de factores como la orientación de un material monocristalino (es decir, depende de la dirección cristalográfica). En las cerámicas, el módulo de Young depende del nivel de porosidad. Por su parte, el módulo de Young de los compuestos depende de la rigidez y las cantidades de los componentes individuales.

La **rigidez** de un componente es proporcional a su módulo de Young. (La rigidez también depende de las dimensiones de los componentes.) Un componente con un módulo de elasticidad alto muestra cambios mucho menores en las dimensiones si el esfuerzo aplicado sólo provoca una deformación elástica cuando se compara con un componente de un módulo de elasticidad menor. En la figura 6-9 se compara el comportamiento elástico del acero y el aluminio. Si se aplica un esfuerzo de

Tabla 6-3 Propiedades elásticas y temperatura de fusión (T_f) de materiales

Material	T_f (°C)	E (MPa)	Razón de Poisson (ν)
Pb	327	13.8×10^3	0.45
Mg	650	44.8×10^3	0.29
Al	660	68.95×10^3	0.33
Cu	1085	1.25×10^5	0.36
Fe	1538	2.07×10^5	0.27
W	3410	4.08×10^5	0.28
Al_2O_3	2020	3.79×10^5	0.26
Si_3N_4		3.03×10^5	0.24

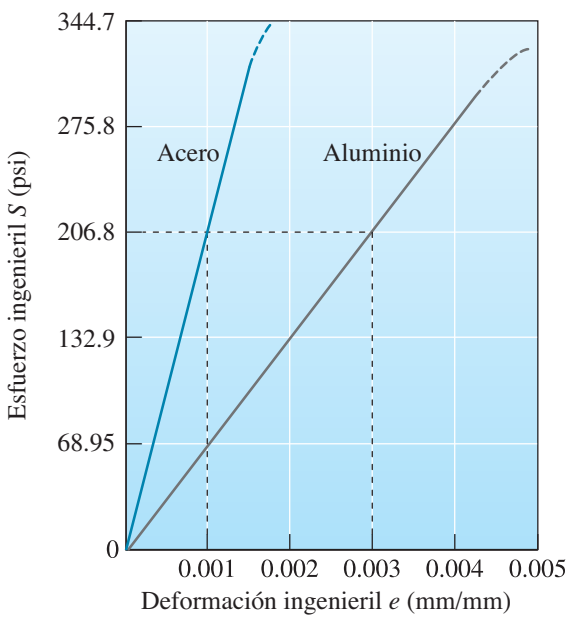


Figura 6-9 Comparación del comportamiento elástico del acero y el aluminio. Ante un esfuerzo dado, el aluminio se deforma de manera elástica tres veces más que el acero (es decir, su módulo elástico es casi tres veces menor).

30,000 psi a cada material, el acero se deforma de manera elástica 0.001 pulg/pulg; al mismo esfuerzo, el aluminio se deforma 0.003 pulg/pulg. El módulo elástico del acero es casi tres veces mayor que el del aluminio.

La figura 6-10 muestra los intervalos de los módulos elásticos de varios materiales de ingeniería. El módulo de elasticidad de los plásticos es mucho menor que el de los metales o cerámicas y vidrios. Por ejemplo, el módulo de elasticidad del nailon es de 2.7 GPa ($\sim 0.4 \times 10^6$ psi); el módulo de las fibras de vidrio es de 72 GPa ($\sim 10.5 \times 10^6$ psi). El módulo de Young de ciertos compuestos reforzados con fibras de vidrio (CRFV) o con fibra de carbono (CRFC) se encuentra entre los valores del polímero de la matriz y la fase de fibra (fibras de carbono o vidrio) y depende de sus fracciones volumétricas relativas. El módulo de Young de muchas aleaciones y cerámicas es mayor, por lo general de hasta 400 GPa ($\sim$60,000 psi). Las cerámicas, debido a la resistencia de sus enlaces iónicos y covalentes, tienen los módulos elásticos más altos.

La **razón de Poisson**, ν, relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo de tensión sencillo o un esfuerzo de compresión con la deformación lateral que ocurre de forma simultánea:

$$\nu = -\frac{-e_{\text{lateral}}}{e_{\text{longitudinal}}} \tag{6-4}$$

En la región elástica de muchos metales, la razón de Poisson es por lo general de alrededor de 0.3 (tabla 6-3). Durante una prueba de tensión, la razón aumenta más allá de la fluencia a alrededor

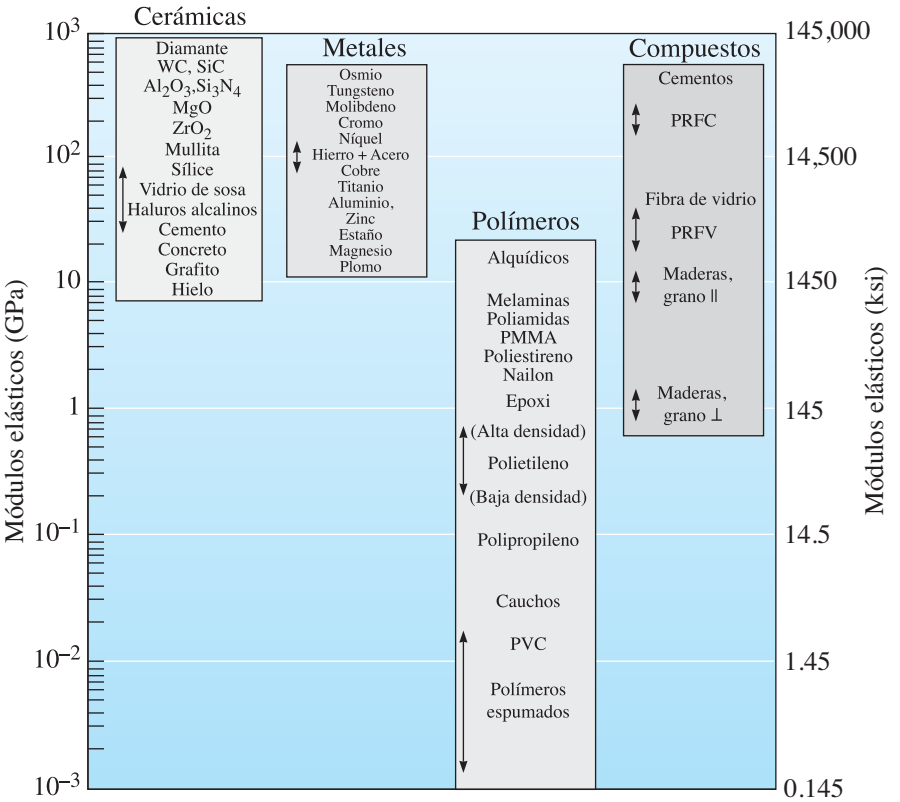


Figura 6-10 Intervalo de los módulos elásticos de distintos materiales de ingeniería. Nota: los valores se muestran en GPa y ksi. (*Basada en* Engineering Materials I, *segunda edición, M. F. Ashby y D. R. H. Jones, Elsevier, 1996*.)

de 0.5, dado que durante la deformación plástica, el volumen permanece constante. Algunas estructuras interesantes, como algunas de panal y de las espumas, tienen razones de Poisson negativas.

El **módulo de resiliencia** (E_r), el área que se encuentra bajo la región elástica de una curva de esfuerzo-deformación, es la energía elástica que absorbe un material durante la carga y que se libera de manera subsecuente cuando se elimina la carga. En el caso del comportamiento elástico lineal:

$$E_r = \left(\frac{1}{2}\right)(\text{resistencia a la fluencia})(\text{deformación en la fluencia}) \tag{6-5}$$

La capacidad de un resorte o de una pelota de golf para desempeñarse de manera satisfactoria depende de un módulo de resiliencia alto.

Tenacidad a la tensión

A la energía que absorbe un material antes de fracturarse se le conoce como **tenacidad a la tensión** y en algunas ocasiones se mide como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación verdaderos (también llamada **trabajo de fractura**). En la sección 6-5 se definirán el esfuerzo y la deformación verdaderos. Dado que es más sencillo medir el esfuerzo-deformación ingenieriles, con frecuencia los ingenieros igualan la tenacidad a la tensión con el área bajo la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles.

Ejemplo 6-3 *Módulo de Young de una aleación de aluminio*

Calcule el módulo de elasticidad de la aleación de aluminio de la cual se muestra la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles en la figura 6-5. Calcule la longitud de una barra de longitud inicial de 1.27 m, cuando se aplica un esfuerzo de tensión de 206.8 MPa.

SOLUCIÓN

Cuando se aplica un esfuerzo de 240.96 MPa, se produce una deformación de 0.0035 mm/mm. Por lo tanto,

$$\text{Módulo de elasticidad} = E = \frac{S}{e} = \frac{240.96 \text{ MPa}}{0.0035} = 68.8 \text{ GPa}$$

Observe que cualquier combinación de esfuerzo y deformación en la región elástica producirá este resultado. A partir de la ley de Hooke,

$$e = \frac{S}{E} = \frac{206.8 \times 10^6 \text{ Pa}}{68.8 \times 10^9 \text{ Pa}} = 0.003 \text{ mm/mm}$$

Con base en la definición de la deformación ingenieril

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Por lo tanto,

$$\Delta l = e(l_0) = (0.003)(1.27 \times 10^3) = 3.81 \text{ mm}$$

Cuando la barra se sujeta a un esfuerzo de 206.8MPa, la longitud total está dada por

$$l = \Delta l + l_0 = 3.81 \times 10^{-3} + 1.27 = 1.274 \text{ m}$$

Ductilidad

La ductilidad es la capacidad de un material para deformarse de manera permanente sin romperse cuando se aplica una fuerza. Existen dos medidas comunes de la ductilidad. El **porcentaje de elongación** cuantifica la deformación plástica permanente en la falla (es decir, no se incluye la deformación elástica que se recupera después de la fractura) midiendo la distancia entre las marcas calibradas en el espécimen antes y después de la prueba. Observe que la deformación después de la falla es menor que la deformación en el punto de ruptura, debido a que el esfuerzo elástico se recupera cuando la carga se elimina. El porcentaje de elongación puede escribirse como

$$\% \text{ Elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \tag{6-6}$$

donde l_f es la distancia entre las marcas calibradas después de que el espécimen se rompe.

Un segundo método es medir el cambio porcentual del área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después de la prueba. La **reducción porcentual** del área describe la cantidad de adelgazamiento que experimenta el espécimen durante la prueba:

$$\% \text{ Reducción del área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \tag{6-7}$$

donde Af es el área de la sección transversal final de la superficie de la fractura después de que falla el espécimen. La ductilidad es importante para los diseñadores de componentes de soporte de carga y para los fabricantes de componentes (barras, varillas, alambres, placas, vigas en I, fibras, etc.) que utilizan algún procesamiento de deformación de materiales.

Ejemplo 6-4 *Ductilidad de una aleación de aluminio*

La aleación de aluminio del ejemplo 6-1 tiene una longitud final después de la falla de 55.753 mm y un diámetro final de 10.11 mm en la superficie fracturada. Calcule la ductilidad de esta aleación.

SOLUCIÓN

$$\% \text{ Elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{55.753 - 50.8}{50.8} \times 100 = 9.75\%$$

$$\text{Porc. (\%) de reducción del área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$
$$= \frac{(\pi/4)(12.83 \times 10^{-3})^2 - (\pi/4)(10.11 \times 10^{-3})^2}{(\pi/4)(12.83 \times 10^{-3})^2} \times 100$$
$$= 37.9\%$$

La longitud final es menor de 56.01 mm (vea la tabla 6-1) debido a que, después de la fractura, se recupera la deformación elástica.

Efecto de la temperatura

Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de la temperatura (figura 6-11). La resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen a temperaturas más altas, mientras que, por lo general, la ductilidad aumenta. Un fabricante de materiales puede desear deformar un material a una temperatura alta (conocido como *trabajo en caliente*) para aprovechar la ductilidad más alta y el esfuerzo menor que se requiere.

Aquí se utiliza el término "temperatura alta" con una nota de cautela. Una temperatura alta se define en relación con la temperatura de fusión. Por lo tanto, 500°C es una temperatura alta para las aleaciones de aluminio; sin embargo, es una temperatura relativamente baja para procesar aceros. En los metales, la resistencia a la fluencia disminuye con rapidez a temperaturas más altas, debido a una disminución de la densidad de las dislocaciones y a un incremento del tamaño de los granos por medio del crecimiento de los granos o a un proceso relacionado, conocido como recristalización (como se describe en el capítulo 8). De manera similar, cualquier endurecimiento que pudo haber ocurrido debido a la formación de precipitados ultrafinos, también puede disminuir a medida que el precipitado comienza a crecer en tamaño o a disolverse en la matriz. En capítulos posteriores se explicarán con mayor detalle estos efectos. Cuando las temperaturas se reducen, muchos metales y aleaciones, pero no todos, comienzan a asumir una consistencia quebradiza.

El incremento de las temperaturas también desempeña una función importante en la formación de materiales poliméricos y vidrios inorgánicos. En varias operaciones de procesamiento de polímeros, como la extrusión o el proceso de estiramiento-soplado (capítulo 16), el incremento de la ductilidad de los polímeros a temperaturas más altas tiene ventajas. De nuevo, se debe tener cuidado en relación con el uso del término "temperatura alta". En el caso de los polímeros, el término "temperatura alta" por lo general se refiere a una temperatura mayor que la temperatura de transición vítrea (T_v). Para este propósito, la temperatura de transición vítrea es una temperatura por debajo de la cual

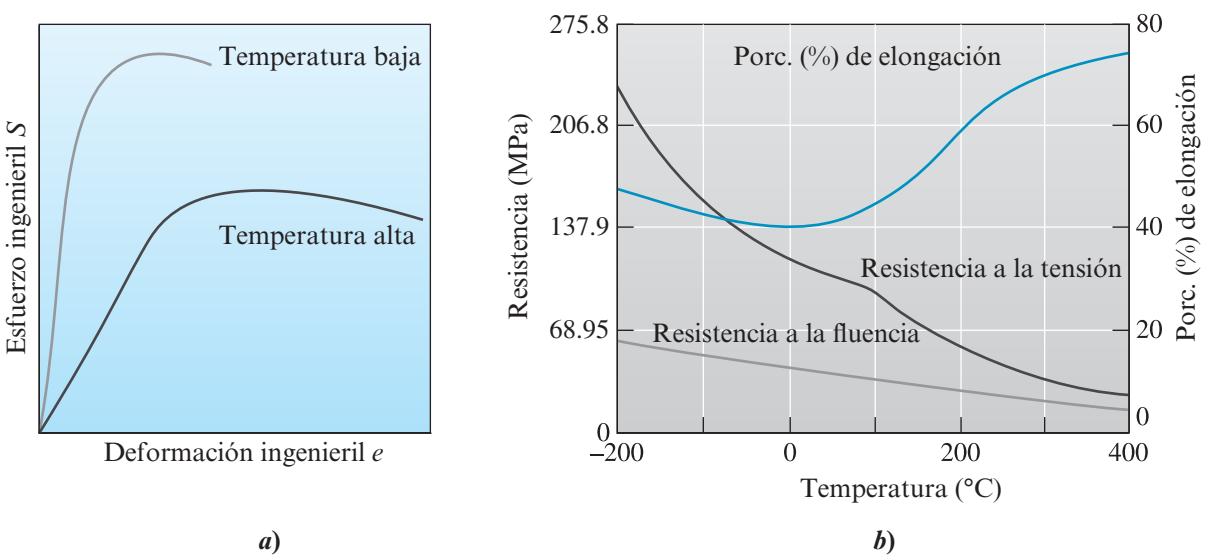


Figura 6-11 Efecto de la temperatura *a*) sobre la curva de esfuerzo-deformación y *b*) sobre las propiedades de tensión de una aleación de aluminio.

se comportan los materiales como materiales quebradizos. Sobre la temperatura de transición vítrea, los plásticos adquieren ductilidad. La temperatura de transición vítrea no es una temperatura fija, pero depende de la rapidez de enfriamiento al igual que de la distribución de los pesos moleculares de los polímeros. Muchos plásticos son dúctiles a temperatura ambiente, debido a que sus temperaturas de transición vítrea están *por debajo* de la temperatura ambiente. Para resumir, muchos materiales poliméricos se endurecerán y se harán más quebradizos a medida que se exponen a temperaturas que estén por debajo de sus temperaturas de transición vítrea. Las razones de la pérdida de ductilidad a menores temperaturas de los polímeros y los materiales metálicos son distintas; sin embargo, este es un factor que desempeñó una función en las fallas del *Titanic* en 1912 (falla metálica) y del *Challenger* en 1986 (falla de polímeros).

Por lo general, los materiales cerámicos y vítreos son quebradizos a temperatura ambiente. A medida que aumenta la temperatura, los vidrios pueden adquirir mayor ductilidad. Como resultado, el procesamiento de vidrios (por ejemplo, el reforzamiento con fibras o la fabricación de botellas) se lleva a cabo a temperaturas altas.

6-5 Esfuerzo verdadero y deformación verdadera

La disminución del esfuerzo ingenieril más allá de la resistencia a la tensión en una curva de esfuerzo-deformación ingenieriles se relaciona con la definición de esfuerzo ingenieril. En estos cálculos se utiliza el área original A_0, pero ésta no es precisa, debido a que el área cambia de manera continua. El esfuerzo verdadero y la deformación verdadera se definen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Esfuerzo verdadero} = \sigma = \frac{F}{A} \tag{6-8}$$

$$\text{Deformación verdadera} = \varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{1}{l_0}\right) \tag{6-9}$$

donde A es el área instantánea sobre la que se aplica la fuerza F, l la longitud instantánea de la muestra y l_0 la longitud inicial. En esencia, en el caso de los metales, la deformación plástica es un proceso a volumen constante (es decir, la creación y la propagación de las dislocaciones resulta en un cambio de volumen despreciable del material). Cuando el supuesto del volumen constante es válida, se puede escribir

$$A_0 l_0 = Al \text{ o } A = \frac{A_0 l_0}{l} \tag{6-10}$$

y utilizando las definiciones de esfuerzo ingenieril S y de deformación ingenieril e, la ecuación 6-8 puede escribirse como

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0}\left(\frac{l}{l_0}\right) = S\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) = S(1 + e) \tag{6-11}$$

También se puede demostrar que

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \tag{6-12}$$

Por lo tanto, es una cuestión sencilla convertir entre los sistemas de esfuerzo-deformación ingenieriles y de esfuerzo-deformación verdaderos. Observe que las expresiones incluidas en las ecuaciones 6-11 y 6-12 no son válidas después de que comienza la estricción, debido a que después de que éste se inicia, la distribución de la deformación a lo largo de la longitud calibrada no es uniforme. Después de que comienza la estricción, debe utilizarse la ecuación 6-8 para calcular el esfuerzo verdadero y utilizarse la expresión

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \tag{6-13}$$

para calcular la deformación verdadera. La ecuación 6-13 surge de las ecuaciones 6-9 y 6-10. Después la estricción, el área instantánea A es el área de la sección transversal del cuello A_{cuello}.

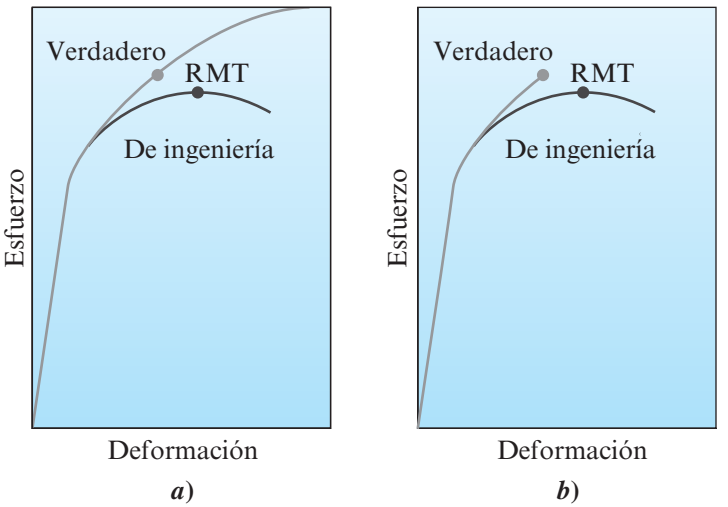


Figura 6-12 *a*) Relación entre el diagrama esfuerzo verdadero-deformación verdadera y el diagrama de esfuerzo-deformación ingenieriles. Las curvas son nominalmente idénticas al punto de fluencia. Se indica con círculos el esfuerzo verdadero que corresponde a la resistencia máxima a la tensión (RMT). *b*) Por lo general, las curvas de esfuerzo-deformación verdaderos deben truncarse en el esfuerzo verdadero que corresponde a la resistencia máxima a la tensión, dado que se desconoce el área de la sección transversal del cuello.

En la figura 6-12*a*) se compara la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera con la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles. No existe un máximo en la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera.

Observe que es difícil medir el área instantánea de la sección transversal del cuello. Por lo tanto, las curvas de esfuerzo verdadero-deformación verdadera por lo general se truncan en el esfuerzo verdadero que corresponde a la resistencia máxima a la tensión, como se muestra en la figura 6-12*b*).

Ejemplo 6-5 *Cálculo del esfuerzo verdadero y la deformación verdadera*

Compare el esfuerzo y la deformación ingenieriles con el esfuerzo y la deformación verdaderos de la aleación de aluminio en el ejemplo 6-1 en *a*) la carga máxima y *b*) en la fractura. El diámetro en la carga máxima es de 12.46 mm y en la fractura es de 10.11 mm.

SOLUCIÓN

a) En la carga máxima:

$$\text{Esfuerzo ingenieril } S = \frac{F}{A_0} = \frac{35584 \text{ N}}{(\pi/4)(0.01283)^2} = 2.75 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Deformación ingenieril } e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{53.85 - 50.8}{50.8} = 0.060 \text{ mm/mm}$$

$$\text{Esfuerzo verdadero} = \sigma = S(1 + e) = 2.75 \times 10^8 \,(1 + 0.06) = 2.92 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\text{Deformación verdadera} = \ln (1 + e) = \ln (1 + 0.060) = 0.058 \text{ mm/mm}$$

La carga máxima es el último punto en el que se aplica la expresión que se utiliza aquí para designar el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera. Observe que se obtienen las mismas respuestas para el esfuerzo y la deformación verdaderos si se utilizan las dimensiones instantáneas:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{35584 \text{ N}}{(\pi/4)(0.01246)^2} = 2.92 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \ln\left[\frac{(\pi/4)(0.01283)^2}{(\pi/4)(0.01246)^2}\right] = 0.058 \text{ mm/mm}$$

En una prueba de tensión, hasta el punto de estricción del esfuerzo ingenieril es menor que el esfuerzo verdadero correspondiente, mientras que la deformación ingenieril es mayor que la deformación verdadera correspondiente.

b) En la fractura,

$$S = \frac{F}{A_0} = \frac{33805 \text{ N}}{(\pi/4)(0.01283)^2} = 2.62 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{56.01 - 50.8}{50.8} = 0.103 \text{ mm/mm}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_f} = \frac{33805 \text{ N}}{(\pi/4)(0.01011)^2} = 4.21 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left[\frac{(\pi/4)(0.01283 \text{ m})^2}{(\pi/4)(0.01011)^2}\right] = 0.476 \text{ mm/mm}$$

Fue necesario utilizar las dimensiones instantáneas para calcular el esfuerzo y la deformación verdaderos, dado que la falla ocurre después del punto de estricción. Después de éste, la deformación verdadera es mayor que la deformación ingenieril correspondiente.

6-6 Prueba de flexión de materiales quebradizos

Por lo general, en los materiales metálicos dúctiles la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles pasa a través de un máximo; este esfuerzo máximo es la resistencia a la tensión del material. La falla ocurre a un esfuerzo ingenieril menor después de que la estricción ha reducido el área de la sección transversal que soporta la carga. En los materiales más quebradizos, la falla ocurre en la carga máxima, donde la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son iguales (figura 6-13).

En muchos materiales quebradizos la prueba de tensión normal no puede llevarse a cabo con facilidad, debido a la presencia de fisuras en la superficie. Con frecuencia, sólo colocar un material quebradizo en las mordazas de la máquina para la prueba de tensión provoca que se agriete. Estos materiales quebradizos pueden probarse utilizando la **prueba de flexión** (figura 6-14). Cuando se aplica la carga en tres puntos y se provoca una flexión, una fuerza de tensión actúa sobre el material opuesta al punto medio. La fractura comienza en esta localización. La **resistencia a la flexión**, o **módulo de ruptura**, describe la resistencia del material:

$$\text{Resistencia a la flexión para la prueba de flexión en tres puntos } \sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL}{2wh^2} \qquad (6\text{-}14)$$

donde F es la carga de la fractura, L la distancia entre los dos puntos externos, w el ancho del espécimen y h la altura del espécimen. La resistencia a la flexión tiene unidades del esfuerzo. Los resultados

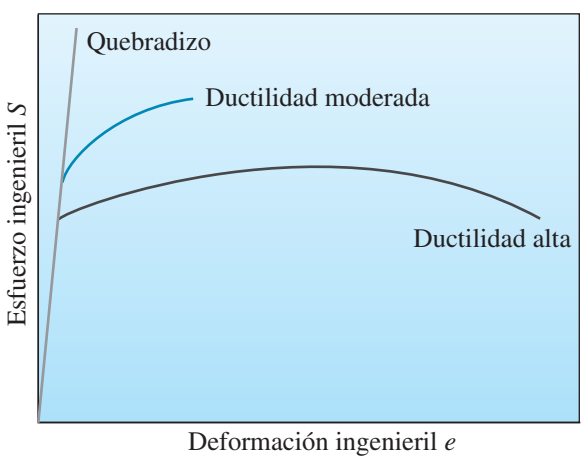


Figura 6-13 Comportamiento de esfuerzo-deformación ingenieriles de los materiales quebradizos en comparación con el de los materiales más dúctiles.

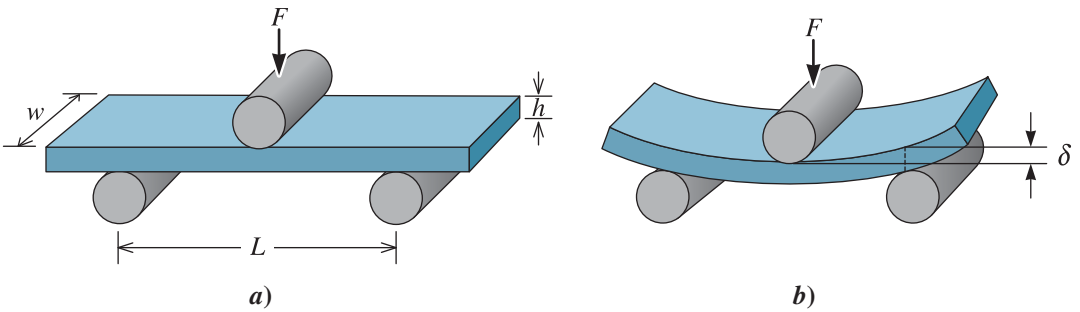


Figura 6-14 *a*) Con frecuencia, la prueba de flexión se utiliza para medir la resistencia de materiales quebradizos y *b*) la deflexión δ que se obtiene por medio de la flexión.

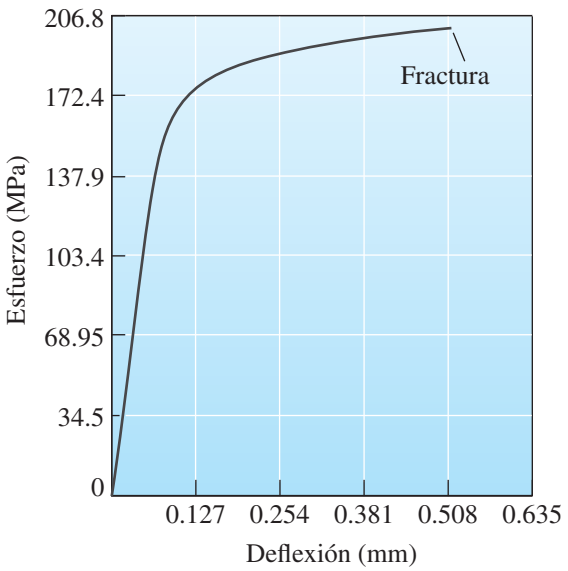


Figura 6-15 Curva de esfuerzo-deflexión del MgO cerámico obtenida a partir de una prueba de flexión.

de la prueba de flexión son similares a los de las curvas de esfuerzo-deformación; sin embargo, el esfuerzo se grafica en función de la deflexión en lugar de hacerlo en función de la deformación (figura 6-15). En la figura 6-16*a*) se muestra el diagrama del momento de flexión correspondiente.

Los módulos de elasticidad en la flexión, o el **módulo de flexión** ($E_{\text{flexión}}$), se calculan como

$$\text{Módulo de flexión } E_{\text{flexión}} = \frac{L^3F}{4wh^3\delta} \tag{6-15}$$

donde δ es la deflexión de la viga cuando se aplica una fuerza F.

Esta prueba también puede realizarse utilizando una configuración conocida como prueba de flexión en cuatro puntos [figura 6-16*b*)]. El esfuerzo máximo o esfuerzo de flexión de una prueba de flexión en cuatro puntos está dada por

$$\sigma_{\text{flexión}} = \frac{3FL}{4wh^2} \tag{6-16}$$

para el caso específico en el que $L_1 = L/4$ en la figura 6-16*b*).

Observe que las deducciones de las ecuaciones 6-14 a 6-16 suponen una respuesta esfuerzo-deformación lineal (por lo que no puede aplicarse de manera correcta a muchos polímeros). La prueba de flexión en cuatro puntos es más adecuada para probar materiales que contienen imperfecciones. Esto se debe a que el momento de flexión entre las platinas internas es constante [figura 6-16*b*)].

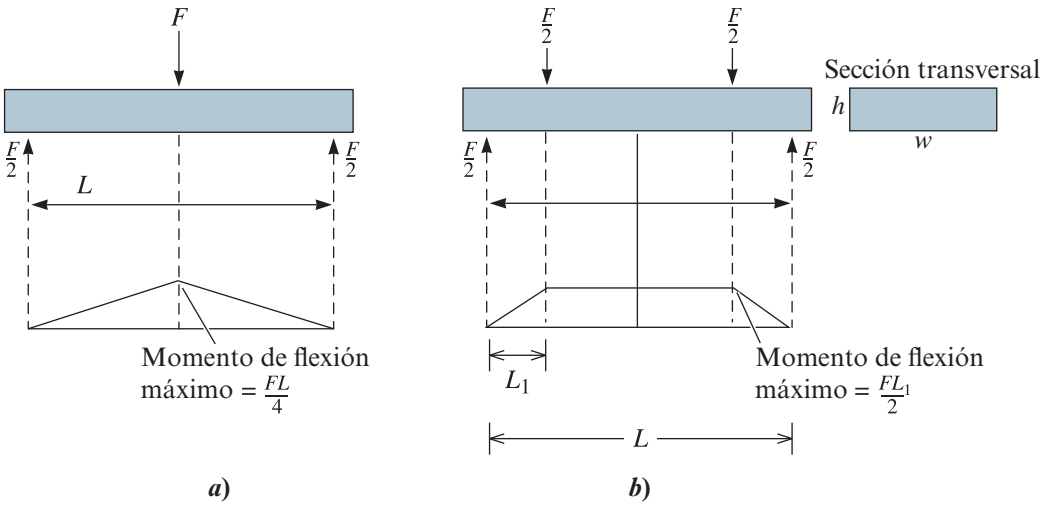


Figura 6-16 Configuración de la prueba de flexión en *a*) tres puntos y *b*) cuatro puntos.

Tabla 6-4 Comparación de las resistencias a la tensión, compresión y flexión de los materiales cerámicos y compuestos seleccionados

Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)
Poliéster: 50% fibras de vidrio	158.6	221	310
Poliéster: 50% tejido de fibra de vidrio	255	186	317
Al_2O_3 (99% puro)	207	2586	345
SiC (sinterizado sin presión)	172.4	3860	552

[a]*Varios materiales compuestos son bastante deficientes bajo compresión.*

Dado que las grietas y las imperfecciones tienden a permanecer cerradas bajo compresión, los materiales quebradizos, como el concreto, con frecuencia se incorporan en los diseños, de tal manera que sólo los esfuerzos de compresión actúen sobre la parte. A menudo, se encuentra que los materiales quebradizos fallan a esfuerzos de compresión mucho más altos que los esfuerzos de tensión (tabla 6-4). Esta es la respuesta a por qué es posible soportar el peso de un camión de bomberos sobre cuatro tazas para café; sin embargo, las cerámicas poseen una tenacidad mecánica muy limitada. Por lo tanto, cuando se deja caer una taza de cerámica para café puede romperse con facilidad.

Ejemplo 6-6 *Resistencia a la flexión de los materiales compuestos*

La resistencia a la flexión de un material compuesto reforzado con fibras de vidrio es de 310 MPa y el módulo de flexión es de 124 GPa determinado en una prueba de flexión de tres puntos. Se soporta una muestra, la cual es de 12.7 mm de ancho, 9.525 mm de alto y 203 mm de largo, entre dos barras separadas 127 mm. Determine la fuerza que se requiere para fracturar el material y la deflexión de la muestra en la fractura, suponiendo que no ocurre ninguna deformación plástica.

SOLUCIÓN

Con base en la descripción de la muestra, $w = 12.7$ mm, $h = 9.525$ mm y $L = 127$ mm. A partir de la ecuación 6-14:

$$310 \times 10^6 = \frac{3FL}{2wh^2} = \frac{(3)(F)(127 \times 10^{-3})}{(2)(12.7 \times 10^{-3})(9.525 \times 10^{-3})^2} = 1.653 \times 10^5$$

$$F = \frac{310 \times 10^6}{1.653 \times 10^5} = 1875 \text{ N}$$

Por lo tanto, la deflexión, a partir de la ecuación 6-15, es

$$124 \times 10^9 = \frac{L^3F}{4wh^3\delta} = \frac{(0.127)^3(1875 \text{ N})}{(4)(12.7 \times 10^{-3})(9.525 \times 10^{-3})^3\delta}$$

$$\delta = 0.706 \text{ mm}$$

En este cálculo se asumió una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, y también que no hay comportamiento viscoelástico.

6-7 Dureza de los materiales

La **prueba de dureza** mide la resistencia a la penetración de la superficie de un material por un objeto duro. La dureza, que como término no puede definirse de manera precisa pues depende del contexto, representa la resistencia a los rayones o a la indentación y una medida cualitativa de la resistencia del material. En general, en las mediciones de la **macrodureza**, la carga aplicada es de ~2 N. Se han diseñado diversas pruebas de dureza, pero las que más se utilizan son la prueba de Rockwell y la prueba de Brinell. En la figura 6-17 se muestran los distintos penetradores empleados en estas pruebas.

En la *prueba de dureza de Brinell*, una esfera de acero duro (por lo general de 10 mm de diámetro) es forzada contra la superficie del material. Se mide el diámetro de la impresión, por lo general de 2 a 6 mm, y se calcula el número de dureza de Brinell (abreviado como DB o NDB) a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{DB} = \frac{2F}{\pi D\left[D - \sqrt{D^2 - D_i^2}\right]} \tag{6-17}$$

donde F es la carga aplicada en kilogramos, D el diámetro del penetrador en milímetros y D_i el diámetro de la impresión en milímetros. La dureza de Brinell tiene las unidades de kg/mm^2.

La *prueba de dureza de Rockwell* utiliza una esfera de acero de diámetro pequeño para materiales blandos y un cono de diamante, o Brale, para materiales más duros. La profundidad de la penetración del penetrador es medida de manera automática por la máquina para realizar la prueba y se convierte a un número de dureza de Rockwell (DR). Dado que no se necesita una medición óptica de las dimensiones de la indentación, la prueba de Rockwell tiende a ser más popular que la de Brinell. Se utilizan diversas variaciones de la prueba de Rockwell, entre ellas las descritas en la tabla 6-5. Se utiliza una prueba de Rockwell *C* (DRC) para medir aceros duros, mientras que podría seleccionarse una prueba de Rockwell *F* (DRF) para el aluminio. Las pruebas de Rockwell proporcionan un número de dureza que no posee unidades.

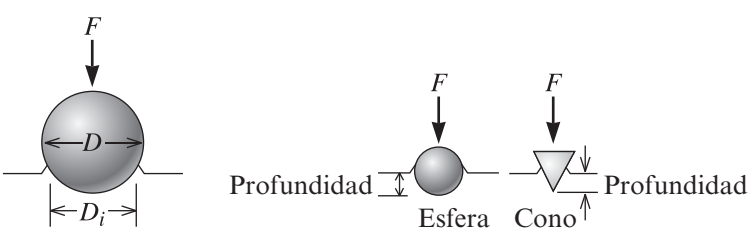


Figura 6-17 Penetradores para las pruebas de dureza de Brinell y de Rockwell.

Tabla 6-5 Comparación de las pruebas de dureza comunes

Prueba	Penetrador	Carga	Aplicación
De Brinell	Esfera de 10 mm	3000 kg	Hierro colado y acero
De Brinell	Esfera de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
De Rockwell *A*	Cono	60 kg	Materiales muy duros
De Rockwell *B*	Esfera de 1/16 pulg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
De Rockwell *C*	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell *D*	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
De Rockwell *E*	Esfera de 1/8 pulg	100 kg	Materiales muy blandos
De Rockwell *F*	Esfera de 1/16 pulg	60 kg	Aluminio, materiales blandos
De Vickers	Pirámide cuadrada de diamante	10 kg	Todos los materiales
De Knoop	Pirámide alargada de diamante	500 g	Todos los materiales

Los números de dureza se utilizan principalmente como una base *cualitativa* para comparar materiales, especificaciones para fabricarlos y tratamiento térmico, control de calidad y correlación con otras propiedades de los materiales. Por ejemplo, la dureza de Brinell se relaciona con la resistencia a la tensión del acero por medio de la relación:

$$\text{Resistencia a la tensión (psi)} = 500\ \text{DB} \tag{6-18}$$

donde DB tiene unidades de kg/mm^2.

La dureza se correlaciona bien con la resistencia al desgaste. Existe una prueba independiente para medir la resistencia al desgaste. Un material que se usa para fragmentar o moler minerales debe ser muy duro para asegurar que no sea erosionado o desgastado por las materias primas duras. De manera similar, los dientes de un engranaje del sistema de transmisión o de impulsión de un vehículo deben ser lo suficientemente duros para que no se desgasten. Por lo general, los materiales poliméricos son excepcionalmente blandos, los metales y aleaciones poseen una dureza intermedia y las cerámicas son excepcionalmente duras. Se usan materiales como el compuesto de carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co), conocido como "carburo", para endurecer herramientas de corte. También se usa el diamante microcristalino o materiales de carbono parecidos al diamante (CPD) para fabricar herramientas de corte y otras aplicaciones.

La prueba de dureza de Knoop (DK) es una **prueba de microdureza**, que forma indentaciones tan pequeñas que se requiere un microscopio para realizar la medición. En estas pruebas, la carga aplicada es menor de 2 N. La prueba de Vickers, que usa un penetrador de pirámide de diamante, puede llevarse a cabo como una prueba de macro o microdureza. Estas últimas son adecuadas para materiales que pueden poseer una superficie cuya dureza es mayor que la del núcleo, materiales en los que las distintas áreas muestran niveles diferentes de dureza, o en muestras que no son macroscópicamente planas.

6-8 Nanoindentación

Las pruebas de dureza descritas en la sección anterior se conocen como pruebas de macro o microdureza, debido a que las medidas de las indentaciones son del orden de milímetros o micrones (micras). Las ventajas de tales pruebas son que son relativamente rápidas, fáciles y económicas. Algunas de las desventajas es que sólo pueden utilizarse en muestras a macroescala y que la dureza es la única propiedad de los materiales que puede medirse de forma directa. La nanoindentación es la prueba de dureza que se lleva a cabo en la escala de longitud nanométrica. Se utiliza una punta pequeña de diamante para indentar el material de interés. La carga impuesta y el desplazamiento se miden de manera continua con una resolución de micronewtons y subnanómetros, respectivamente.

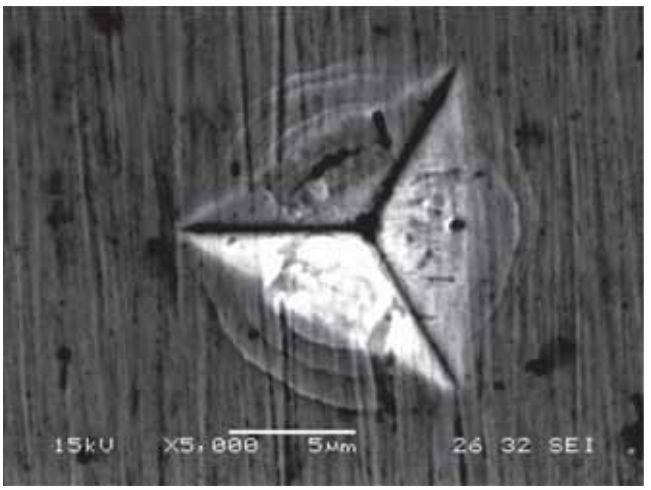


Figura 6-18 Indentación de un vidrio metálico voluminoso de $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$ realizada con una punta de Berkovich en un nanopenetrador. (*Cortesía de Gang Feng, Villanova University*)

La carga y el desplazamiento se miden mediante el proceso de indentación. Las técnicas de nanoindentación son importantes para medir las propiedades mecánicas de películas delgadas en sustratos (como en aplicaciones microelectrónicas) y de materiales en nanofase y para deformar estructuras a micro y nanoescala que se sitúan de manera libre. La nanoindentación puede llevarse a cabo con una alta precisión en el posicionamiento, lo cual permite indentaciones dentro de granos seleccionados de un material. Los nanoindentadores incorporan microscopios ópticos y en algunas ocasiones capacidad de microscopio de sondeo de barrido. La dureza y el módulo de elasticidad se miden con base en la nanoindentación.

Las puntas de los nanopenetradores tienen diversas formas. A una forma común se le conoce como penetrador de Berkovich, el cual es una pirámide con tres lados. En la figura 6-18 se muestra una indentación realizada por un penetrador de Berkovich. Cada lado de la indentación de la figura mide 12.5 μm y tiene una profundidad de alrededor de 1.6 μm.

La primera etapa de una prueba de nanoindentación involucra el desarrollo de indentaciones sobre un patrón de calibración. La sílice fundida es un patrón de calibración común, debido a que tiene propiedades mecánicas homogéneas y bien caracterizadas (módulo de elasticidad $E = 72$ GPa y razón de Poisson $\nu = 0.17$). El propósito de efectuar indentaciones sobre el estándar de calibración es determinar el área de contacto proyectada de la punta del penetrador A_c como una función de la profundidad de la indentación. En el caso de una punta de Berkovich perfecta,

$$A_c = 24.5\, h_c^2 \tag{6-19}$$

Esta función relaciona el área de la sección transversal del penetrador con la distancia de la punta h_c que está en contacto con el material que se está indentando. La punta no está perfectamente afilada y se desgasta y cambia de forma con cada uso. Por lo tanto, debe llevarse a cabo una calibración cada vez que se usa la punta, como se explicará más adelante.

La profundidad total de la indentación h (medida por el desplazamiento de la punta) es la suma de la profundad de contacto h_c y la profundidad h_s en la periferia de la indentación donde el indentador no hace contacto con la superficie del material, es decir,

$$h = h_c + h_s \tag{6-20}$$

como se muestra en la figura 6-19. El término del desplazamiento de la superficie h_s se calcula con base en

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{\text{máx}}}{S} \tag{6-21}$$

donde $P_{\text{máx}}$ es la carga máxima y ε una constante geométrica igual a 0.75 de un penetrador de Berkovich. S es la rigidez al descargar.

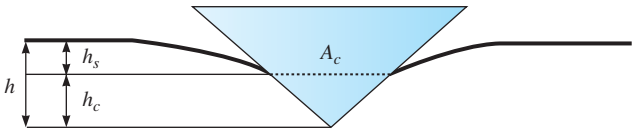


Figura 6-19 Relación entre la profundidad total de la indentación h, profundidad del contacto h_c, y el desplazamiento de la superficie en la periferia de la indentación h_s. En esta vista lateral se observa el área de contacto A_c a una profundidad h_c. (Basada en W. C. Oliver y G. M. Pharr "An improved technique for determining hardness and elastic modules using load and siplacement", en *Journal of Materials Research*, vol. 7, núm. 6, pp.1564-1583, Materials Research Society, 1992.)

Durante la nanoindentación, la carga impuesta se mide como una función de la profundidad de la indentación h, como se muestra en la figura 6-20. En la carga, la deformación es elástica y plástica. A medida que se retira el penetrador del material, la recuperación es elástica. La rigidez al descargar se mide como la pendiente de una curva de la ley de potencias ajustada a la curva de la descarga a la profundidad máxima de la indentación. El módulo elástico reducido E_r se relaciona con la rigidez al descargar S con base en

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta}\frac{S}{\sqrt{A_c}} \tag{6-22}$$

donde β es una constante de la forma del penetrador que se está utilizando ($\beta = 1.034$ en el caso de un penetrador de Berkovich). El módulo reducido E_r está dado por

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \tag{6-23}$$

donde E y ν son el módulo elástico y la razón de Poisson del material que se está indentando, respectivamente, mientras que E_i y ν_i son el módulo elástico y la razón de Poisson del penetrador, respectivamente (para el diamante, $E_i = 1.141$ TPa y $\nu_i = 0.07$). Dado que se conocen las propiedades elásticas del patrón, la única incógnita en la ecuación 6-22 para calibrar la indentación es A_c.

Con la ecuación 6-22, el área de contacto proyectada se calcula para una profundidad de contacto específica. Cuando el experimento se lleva a cabo de manera subsecuente sobre el material de interés, la misma función de la forma de la punta se utiliza para calcular el área de contacto proyectada para la misma profundidad de contacto. La ecuación 6-22 se utiliza de nuevo con el módulo elástico de material que es la cantidad desconocida de interés. (Debe suponerse una razón de Poisson

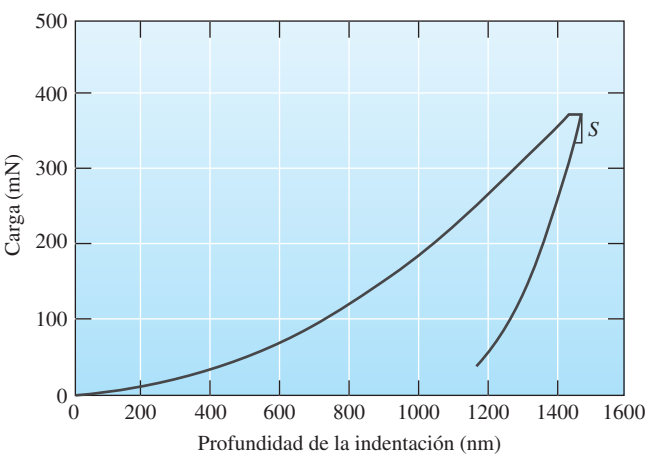


Figura 6-20 La carga como una función de la profundidad de la indentación en una nanoindentación del MgO. Se indica la rigidez al descargar S a la carga máxima.

para el material que se está indentando. Como se vio en la tabla 6-3, los valores comunes van de 0.2 a 0.4 en el caso de la mayoría de los metales que tienen una razón de Poisson de alrededor de 0.3. Los errores de este supuesto dan por resultado un error relativamente pequeño en la medición del módulo elástico.)

La dureza de un material determinada por la nanoindentación se calcula como

$$H = \frac{P_{\text{máx}}}{A_c} \tag{6-24}$$

Por lo general, la dureza (determinada por la nanoindentación) se reporta con unidades GPa y los resultados de indentaciones múltiples por lo general se promedian para incrementar la precisión.

Ejemplo 6-7 *Nanoindentación del MgO*

La figura 6-20 muestra los resultados de una indentación en el MgO monocristalino (001) utilizando un penetrador de diamante de Berkovich. La rigidez de la descarga a una profundidad de indentación máxima de 1.45 μm es 1.8×10^6 N/m. Una calibración sobre la sílice fundida indica que el área de contacto proyectada a la profundidad de contacto correspondiente es de 41 μm^2. La razón de Poisson del MgO es de 0.17. Calcule el módulo elástico y la dureza del MgO.

SOLUCIÓN

El área de contacto proyectada $A_c = 41\ \mu m^2 \times \dfrac{(1\text{ m})^2}{(10^6\ \mu\text{m})^2} = 4.1 \times 10^{-11}\ \text{m}^2$

El módulo reducido está dado por

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta}\frac{S}{\sqrt{A_c}} = \frac{\sqrt{\pi}(1.8 \times 10^6\ \text{N/m})}{2(1.034)\sqrt{(4.1 \times 10^{-11}\ \text{m}^2)}} = 241 \times 10^9\ \text{N/m}^2 = 241\ \text{GPa}$$

Al sustituir la razón de Poisson del MgO y las constantes elásticas del diamante y resolviendo para E,

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - 0.17^2}{E} + \frac{1 - 0.07^2}{1.141 \times 10^{12}\ \text{Pa}} = \frac{1}{241 \times 10^9\ \text{Pa}}$$

$$\frac{0.9711}{E} = \frac{1}{241 \times 10^9\ \text{Pa}} - \frac{1 - 0.07^2}{1.141 \times 10^{12}\ \text{Pa}}$$

$$E = 296\ \text{GPa}$$

A partir de la figura 6-20, la carga a la profundidad de la indentación de 1.45 μm es de 380 mN (380×10^3 N). Por lo tanto, la dureza es

$$H = \frac{P_{\text{máx}}}{A_c} = \frac{380 \times 10^{-3}\ \text{N}}{4.1 \times 10^{-11}\ \text{m}^2} = 9.3 \times 10^9\ \text{Pa} = 9.3\ \text{GPa}$$

Este análisis calcula el módulo elástico y la dureza a la carga máxima; sin embargo, en la actualidad se emplea de modo normal una técnica experimental conocida como nanoindentación dinámica. Durante este procedimiento, se superpone una carga oscilante pequeña sobre la carga total en la muestra. De esta manera, la muestra se descarga elásticamente de manera continua a medida que se incrementa la carga total. Esto permite mediciones continuas del módulo elástico y de la rigidez como una función de la profundidad de la indentación.

Este análisis por nanoindentación fue publicado en 1992 en el *Journal of Materials Research* y se conoce como el método de Oliver y Pharr, nombrado así en honor de Warren C. Oliver y George M. Pharr.

6-9 Efectos de la rapidez de deformación y comportamiento ante el impacto

Cuando un material sufre un golpe intenso y repentino, en el que la rapidez de deformación es extremadamente rápida, puede comportarse de una manera mucho más quebradiza que la que se observa en la prueba (ensayo) de tensión. Por ejemplo, este fenómeno puede observarse en muchos plásticos y materiales como el Silly Putty®. Si estira un plástico como el polietileno o el Silly Putty® de manera muy lenta, las moléculas del polímero tienen tiempo para desenredarse o las cadenas de deslizarse entre sí, lo que da como resultado grandes deformaciones plásticas. Sin embargo, si se aplica una carga de impacto, no hay tiempo suficiente para que estos mecanismos desempeñen una función y los materiales se rompen de manera quebradiza. Con frecuencia se utiliza una **prueba (ensayo) de impacto** para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. En contraste con la prueba de tensión, en ésta la rapidez de deformación es mucho mayor ($\dot{\varepsilon} \sim 10^3\ s^{-1}$).

Se han diseñado varios procedimientos de prueba, entre ellos la prueba de *Charpy* y la de *Izod* (figura 6-21). Esta última se utiliza con frecuencia para probar los materiales plásticos. El espécimen de la prueba puede o no tener una muesca; los especímenes con muesca en V miden mejor la resistencia del material a la propagación del agrietamiento.

En esta prueba, un péndulo pesado comienza a una elevación h_0, se balancea a través de su arco, golpea y rompe el espécimen y alcanza una elevación final menor h_f. Si se conocen las elevaciones inicial y final del péndulo, se puede calcular la diferencia en energía potencial. Esta diferencia es la **energía de impacto** que absorbe el espécimen durante la falla. Para la prueba de Charpy, la energía se expresa por lo general en pies-libras (ft · lb) o en joules (J), donde 1 ft · lb = 1.356 J. Los resultados de la prueba de Izod se expresan en unidades de ft · lb/pulg o J/m. A la capacidad de un material para soportar un golpe de impacto con frecuencia se conoce como **tenacidad de impacto** del material. Como ya se mencionó, en algunas ocasiones se considera el área bajo la curva esfuerzo-deformación verdaderos o ingenieriles como una medida de la **tenacidad a la tensión**. En ambos casos se mide

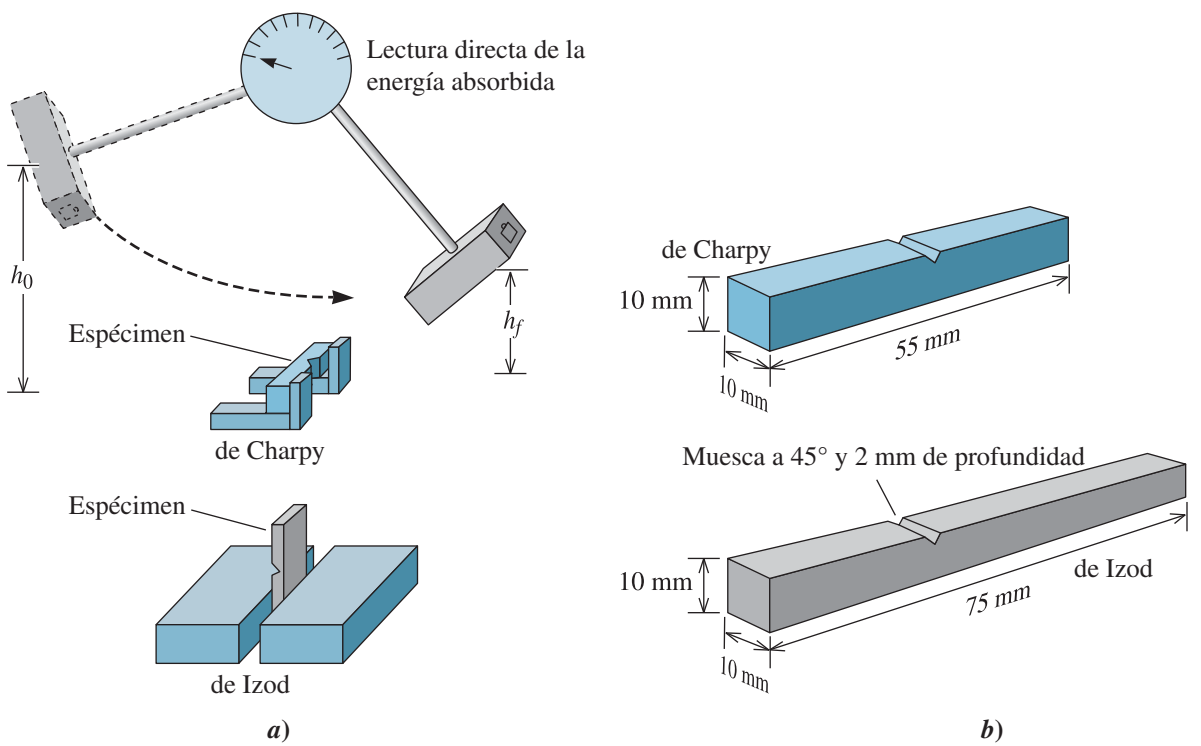


Figura 6-21 Prueba de impacto: *a*) pruebas de Charpy y de Izod, y *b*) dimensiones de los especímenes comunes.

la energía necesaria para fracturar un material. La diferencia es que, en las pruebas de tensión, la rapidez de deformación es mucho menor en comparación con la que se considera en una prueba de impacto. Otra diferencia es que en una prueba de impacto por lo general se trata con materiales que tienen una muesca. La **tenacidad a la fractura** de un material se define como la capacidad de un material con imperfecciones para soportar una carga aplicada. En el capítulo 7 se explicará la tenacidad a la fractura.

6-10 Propiedades que se descubren a partir de la prueba de impacto

En la figura 6-22 se muestra una curva que muestra las tendencias de los resultados de una serie de pruebas de impacto desarrolladas sobre el nailon a varias temperaturas. En la práctica, las pruebas se realizan a un número limitado de temperaturas.

Temperatura de transición de dúctil a quebradizo (TTDQ)

La **temperatura de transición de dúctil a quebradizo** es la temperatura a la cual el modo de falla de un material cambia de fractura dúctil a quebradiza. Esta temperatura puede definirse por medio de la energía promedio entre las regiones dúctil y quebradiza, a alguna energía absorbida específica o por medio de alguna aparición de una fractura característica. Un material que sufre un golpe de impacto durante el servicio debe tener una temperatura de transición *por debajo* de la temperatura de su entorno.

No todos los materiales tienen una temperatura de transición distintiva (figura 6-23). Los metales CCCu tienen temperaturas de transición, lo cual no sucede con la mayoría de los metales CCCa. Los metales CCCa tienen energías absorbidas altas, las cuales disminuyen de manera gradual y, en algunas ocasiones, incluso aumentan a medida que disminuye la temperatura. Como ya se mencionó, el efecto de esta transición en el acero pudo haber contribuido a la falla del casco del *Titanic*.

En los materiales poliméricos, la temperatura de transición de dúctil a quebradizo está estrechamente relacionada con la temperatura de transición vítrea y para propósitos prácticos se trata como la misma. Como ya se explicó, la temperatura de transición de los polímeros que se usan en los anillos selladores del cohete propulsor y otros factores condujeron al desastre del *Challenger*.

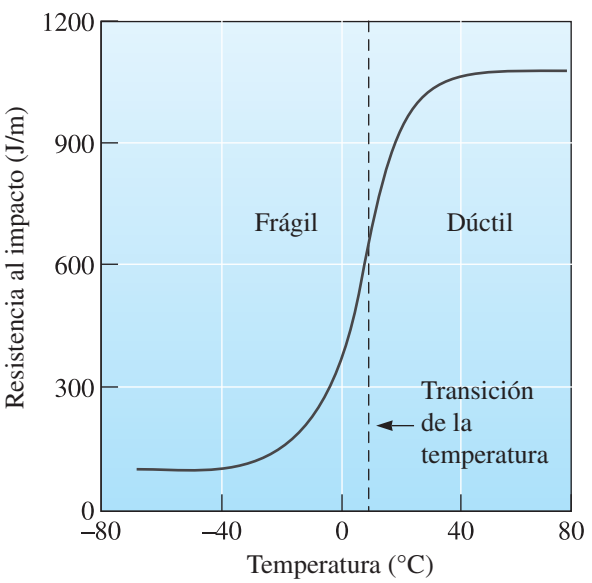


Figura 6-22 Resultados a partir de una serie de pruebas de impacto de Izod en un polímero termoplástico de nailon duro.

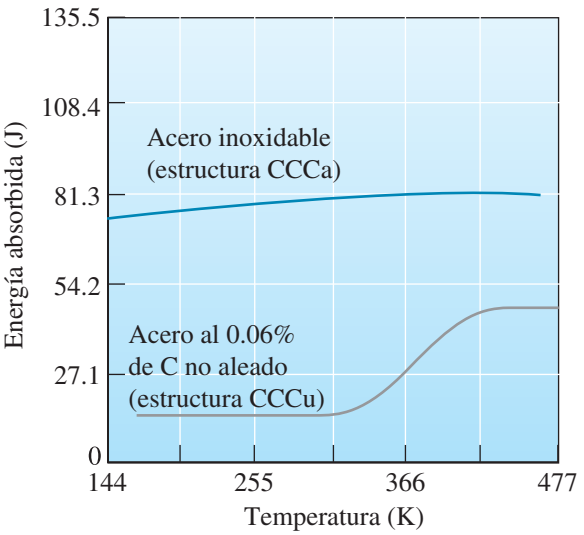


Figura 6-23 Propiedades de la muesca en V de Charpy en un acero al carbono CCCu y un acero inoxidable CCCa. Por lo general, la estructura cristalina CCCa conduce a energías absorbidas más altas y a ninguna temperatura de transición.

Sensibilidad a la muesca

La muesca que ocasiona un maquinado, una fabricación o un diseño deficientes concentra los esfuerzos y reduce la tenacidad de los materiales. La **sensibilidad a la muesca** de un material puede evaluarse comparando las energías absorbidas de la muesca en función de los especímenes sin muesca. Las energías absorbidas son mucho menores en los especímenes con muesca si el material es sensible a ella. En la sección 7-7 se explicará cómo afecta la presencia de muescas el comportamiento de los materiales sujetos a un esfuerzo cíclico.

Relación con el diagrama de esfuerzo-deformación

La energía que se requiere para romper un material durante la prueba de impacto (es decir, la tenacidad de impacto) no siempre está relacionada con la tenacidad a la tensión [esto es, el área bajo la curva de esfuerzo-deformación verdaderos (figura 6-24)]. Como ya se indicó, los ingenieros con frecuencia consideran el área bajo la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles como la tenacidad a la tensión. En general, los metales con resistencia y ductilidad altas tienen buena tenacidad a la tensión; sin embargo, este no es siempre el caso cuando las velocidades de deformación son altas. Por ejemplo, los metales que muestran una excelente tenacidad a la tensión pueden mostrar un comportamiento quebradizo ante rapidez de deformación alta (es decir, pueden mostrar una tenacidad de impacto deficiente). Por lo tanto, la rapidez de la deformación impuesta puede desplazar la transición de dúctil a quebradizo. Por lo general, las cerámicas y muchos compuestos tienen tenacidad deficiente, aun cuando tienen una resistencia alta, debido a que casi no muestran ductilidad. Estos materiales muestran tenacidad a la tensión y tenacidad de impacto deficientes.

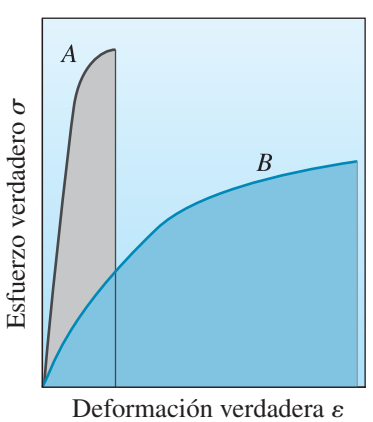


Figura 6-24 El área bajo la curva de esfuerzo verdadero- deformación verdadera se relaciona con la tenacidad a la tensión. Aunque el material *B* tiene una menor resistencia a la fluencia, absorbe más energía que el material *A*. A partir de estas curvas, las energías pueden no ser iguales a las que se obtienen a partir de la información de la prueba de impacto.

Uso de las propiedades de impacto La energía absorbida y la TTDQ son muy sensibles a las condiciones de carga. Por ejemplo, una rapidez más alta de la aplicación de energía al espécimen reduce la energía absorbida e incrementa la TTDQ. El tamaño del espécimen también afecta los resultados; puesto que es más difícil que un material grueso se deforme, se requieren energías menores para romper los materiales más gruesos. Por último, la configuración de la muesca afecta el comportamiento; una grieta en una superficie puntiaguda y afilada permite energías absorbidas menores que las de una muesca en V. Debido a que con frecuencia no se pueden predecir o controlar todas estas condiciones, la prueba de impacto es una manera rápida, conveniente y económica de comparar distintos materiales.

Ejemplo 6-8 *Diseño de un mazo*

Diseñe un mazo de ocho libras (o 3.63 kg) para clavar postes para una cerca de acero en el suelo.

SOLUCIÓN

Primero se deben considerar los requerimientos del diseño que coincidan con el mazo. Una lista parcial debería incluir:

1. El mango no debe ser muy pesado, pero lo suficientemente duro para que no se rompa de manera estrepitosa.
2. La cabeza no debe romperse o astillarse durante el uso, aun a temperaturas bajo cero.
3. La cabeza no debe deformarse durante el uso continuo.
4. La cabeza debe ser lo suficientemente grande para asegurar que el usuario no falle el poste para cerca y no debe incluir muescas filosas que podrían provocar astillado.
5. El mazo debe ser económico.

Aunque el mango podría ser de un material compuesto duro y ligero [como un polímero reforzado con fibras Kevlar (un polímero especial)], un mango de madera de alrededor de 762 mm de largo sería mucho más barato y tendría la tenacidad suficiente. Como se muestra en el capítulo 17, la madera puede categorizarse como un compuesto reforzado con fibras naturales.

Para fabricar la cabeza, se prefiere un material que tenga una temperatura de transición baja, que pueda absorber una energía relativamente alta durante el impacto y que también posea la dureza suficiente para evitar su deformación. El requisito de tenacidad descartaría la mayoría de las cerámicas. Un metal cúbico centrado en la cara, como el acero inoxidable o el cobre CCCa, podría proporcionar una tenacidad superior aun a temperaturas bajas; sin embargo, estos metales son relativamente blandos y costosos. Una elección apropiada podría ser un acero CCCu. Los aceros ordinarios son baratos, tienen dureza y resistencia adecuadas y algunos tienen la tenacidad suficiente a temperaturas bajas.

En el apéndice A se encuentra que la densidad del hierro es de 7,870 kg/m^3. Se supone que la densidad del acero es casi la misma. El volumen requerido del acero es de V = (3.63/7870) = 4.61×10^{-4}m^3. Para asegurar que golpeará el blanco, la cabeza podría tener una forma cilíndrica, con un diámetro de 63.5 mm. La longitud de la cabeza sería entonces de 147.3 mm.

6-11 Vidrios metálicos voluminosos y su comportamiento mecánico

Los metales, como se encuentran en la naturaleza, son cristalinos; sin embargo, cuando aleaciones particulares de muchos componentes se enfrían rápidamente, pueden formarse metales amorfos. Algunas aleaciones requieren de velocidades de enfriamiento tan altas como 10^6 K/s para formar una estructura amorfa (“o vidriosa”), pero recientemente se han encontrado nuevos compuestos que requieren velocidades de enfriamiento en el orden de sólo unos grados por segundo. Estos avances

han permitido producir los llamados "vidrios metálicos voluminosos" —vidrios metálicos con grosores o diámetros tan grandes de hasta 5 cm (2 pulg).

Antes del desarrollo de los vidrios metálicos voluminosos, los metales amorfos se producían por medio de diversas técnicas de solidificación rápida, entre ellas un proceso conocido como hilatura por fusión. Cuando se recurre a este procedimiento, el metal líquido se vierte en carretes enfriados que rotan e "hilan" cintas delgadas en el orden de 10 μm de grosor. Es difícil llevar a cabo pruebas mecánicas sobre cintas; por lo tanto, el desarrollo de vidrios metálicos voluminosos permite pruebas mecánicas que antes no eran posibles. Los vidrios metálicos voluminosos pueden producirse por medio de varios métodos. Uno de ellos involucra el uso de un arco eléctrico para fusionar elementos de alta pureza y después el colado por aspiración o por vertido en moldes de cobre enfriados.

Como se muestra en la figura 6-25, los vidrios metálicos exhiben fundamentalmente un comportamiento de esfuerzo-deformación distinto del de otras clases de materiales. Lo más notable es que los vidrios metálicos son materiales con una resistencia alta excepcional. Por lo general tienen resistencias a la fluencia en el orden de 2 GPa (290 kpsi), comparables con las de los aceros con las resistencias más altas, y se han reportado resistencias a la fluencia de hasta 5 GPa (725 kpsi) en el caso de aleaciones metálicas amorfas basadas en hierro. Dado que los vidrios metálicos no son cristalinos, no contienen dislocaciones. Como se aprendió en el capítulo 4, las dislocaciones generan resistencias a la fluencia menores a las pronosticadas de manera teórica para los materiales cristalinos perfectos. Las altas resistencias de los vidrios metálicos se deben a la falta de dislocaciones en su estructura amorfa.

A pesar de sus resistencias altas, los vidrios metálicos son por lo general quebradizos. La mayoría de los vidrios metálicos muestran una deformación plástica casi de cero en tensión y sólo un bajo porcentaje de deformación plástica en compresión (en comparación con las decenas de porcentaje de deformación plástica de los metales cristalinos). Esta falta de ductilidad se relaciona con la falta de dislocaciones. Dado que los vidrios metálicos no contienen dislocaciones, no se endurecen por trabajo (es decir, el esfuerzo no aumenta con la deformación después de que ha comenzado la deformación plástica, como se muestra en la figura 6-25. En el capítulo 8 se explicará con detalle el endurecimiento por trabajo, conocido como endurecimiento por deformación). Por lo tanto, cuando la deformación se localiza, se intensifica y conduce rápidamente a la falla.

A temperatura ambiente los vidrios metálicos se deforman de manera permanente a través del cortante intenso en bandas estrechas del material de alrededor de 10 a 100 nm de grosor. Esto crea desplazamientos cortantes en los bordes del material, como se muestra en la figura 6-26. En el caso de la compresión, esto da por resultado una disminución de la longitud en la dirección del eje de carga. A medida que procede la plasticidad, se forman más bandas cortantes y se propagan a través de la muestra. Se forman más bandas cortantes para acomodar la deformación plástica creciente hasta que, por último, una de ellas provoca una falla de la muestra. En la figura 6-25 se pueden observar los

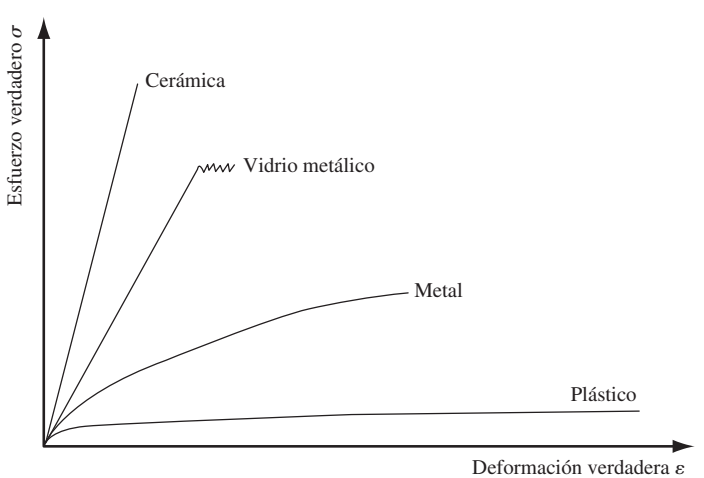


Figura 6-25 Diagrama esquemático del comportamiento esfuerzo-deformación bajo compresión de varios materiales de ingeniería, entre ellos, los vidrios metálicos. El flujo dentado se observa en la región plástica.

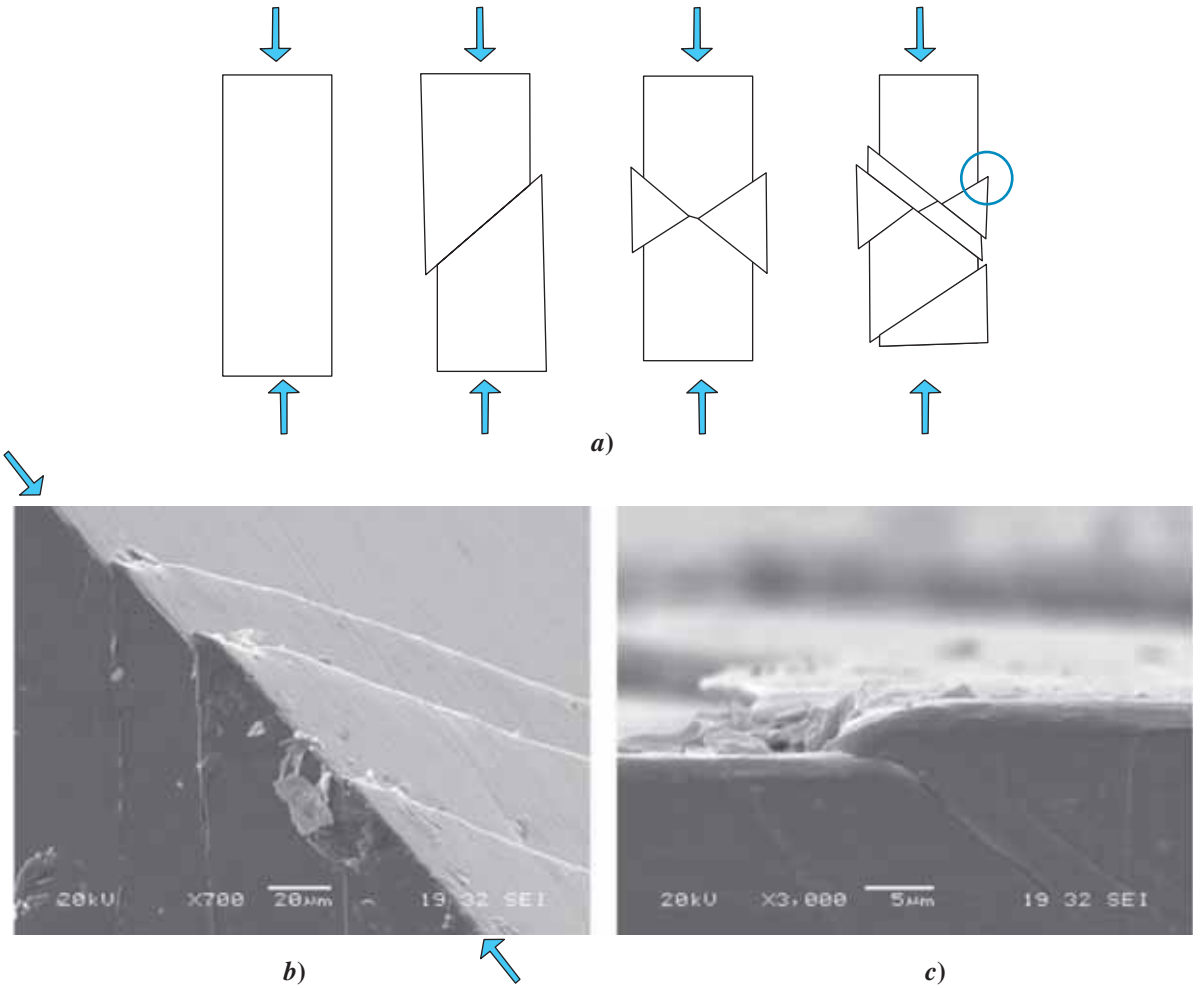


Figura 6-26 *a*) Diagrama esquemático de la formación de bandas cortantes en un vidrio metálico que muestra las etapas sucesivas de una prueba de compresión. *b*) Micrografía electrónica de barrido que muestra tres bandas cortantes en el vidrio metálico voluminoso de $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$. Las flechas indican la dirección de la carga. *c*) Micrografía electrónica de barrido del desplazamiento de una banda cortante en un vidrio metálico voluminoso de $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$. La localización de tal desplazamiento se encierra en un círculo en *a*). (*Fotografías cortesía de Wendelin Wright*)

efectos de las bandas cortantes. Cuando se deforma por compresión una muestra de un vidrio metálico a una velocidad constante de desplazamiento, la carga (o esfuerzo) disminuye a medida que se propagan las bandas cortantes. Este fenómeno conduce al comportamiento de esfuerzo-deformación "dentado" que se muestra en la figura 6-25. Aunque algunos materiales cristalinos muestran comportamiento dentado, el origen de este fenómeno es completamente diferente en los metales amorfos. Los esfuerzos actuales de investigación se centran en la comprensión del proceso de formación de bandas cortantes en los vidrios metálicos y en la prevención de que las bandas cortantes provoquen la falla de la muestra.

Los vidrios metálicos tienen aplicaciones en el equipamiento deportivo, cubiertas electrónicas, componentes de defensa y como materiales estructurales. Son casi adecuados como recubrimientos industriales, debido a su dureza alta y buena resistencia a la corrosión (de nuevo debido a la falta de dislocaciones en la estructura). Todas las aplicaciones potenciales deben usar bien los vidrios metálicos muy por debajo de sus temperaturas de transición vítrea, dado que se cristalizarán y perderán su comportamiento mecánico único a altas temperaturas.

6-12 Comportamiento mecánico a escalas pequeñas de longitud

Debido al desarrollo de películas delgadas en sustratos para aplicaciones microelectrónicas y la síntesis de estructuras con dimensiones a escala nanométrica, los científicos de materiales han observado que éstos pueden mostrar propiedades mecánicas diferentes, lo cual depende de la escala de longitud a la que se deseen probar los materiales. Se han desarrollado varias técnicas experimentales para medir el comportamiento mecánico a escalas de longitud pequeñas. La nanoindentación, la cual se explicó en la sección 8, se utiliza para este propósito. Otra técnica se conoce como análisis de la curvatura de la oblea.

Cuando se aplica esta última técnica se cicla la temperatura de una película delgada en un sustrato, por lo general de la temperatura ambiente a varios cientos de grados Celsius. Dado que la película delgada y el sustrato tienen coeficientes distintos de expansión térmica, se expanden (o contraen) a velocidades diferentes. Estos fenómenos inducen esfuerzos en la película delgada. Tales esfuerzos en la película son directamente proporcionales al cambio en la curvatura del sistema película-sustrato a medida que se cicla la temperatura. En la figura 6-27*a*) se muestra un ejemplo de un experimento de curvatura de una película delgada de aluminio policristalino de 0.5 μm en un sustrato de silicio oxidado. El aluminio tiene un coeficiente de expansión térmico mayor que el del silicio.

La figura 6-27*b*) muestra dos ciclos del experimento. El experimento comienza con el sistema película-sustrato a temperatura ambiente. El aluminio tiene un esfuerzo residual de 30 MPa a esta temperatura debido al enfriamiento de la temperatura de procesamiento. Durante el primer

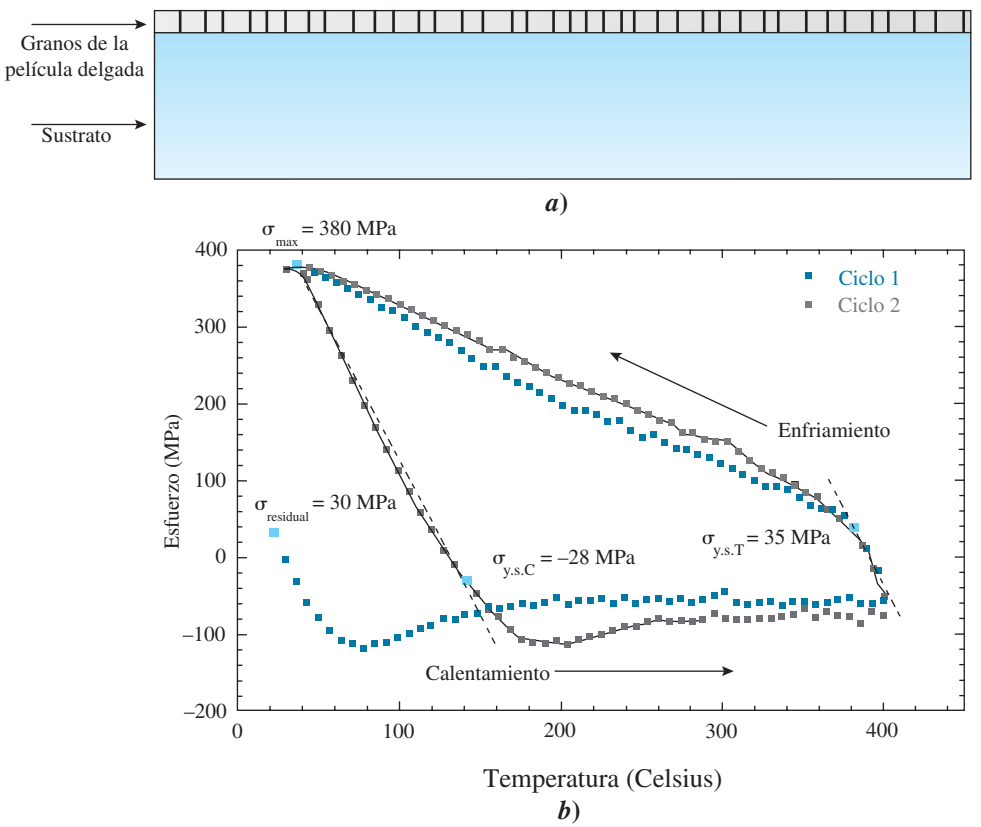


Figura 6-27 *a*) Diagrama esquemático de una película delgada en un sustrato. Los granos tienen diámetros en el orden del grosor de la película. Observe que, por lo general, las películas delgadas tienen grosores de alrededor de 1/500 del grosor del sustrato (algunas son mucho más delgadas) y, por lo tanto, este diagrama no está trazado a escala. *b*) Esfuerzo en función de la temperatura del proceso cíclico térmico de una película delgada de aluminio policristalino de 0.5 μm en un sustrato de silicio oxidado durante un experimento de curvatura de la oblea.

ciclo los granos en la película crecen a medida que aumenta la temperatura (capítulo 8). A medida que los granos crecen, el área de sus límites disminuye y la película se densifica. Al mismo tiempo, el aluminio se expande de manera más rápida que el silicio y está restringido a la expansión por el sustrato de silicio al cual está enlazado. Por ello, el aluminio está sujeto a un estado de compresión. A medida que aumenta la temperatura, el aluminio se deforma de manera plástica. El esfuerzo no se incrementa de manera notable, debido a que el incremento de la temperatura provoca una disminución de la resistencia.

A medida que el sistema se enfría, el aluminio se contrae más con la diminución de la temperatura de como lo hace el silicio. A medida que el aluminio se contrae, primero se descarga de manera elástica y después se deforma de manera plástica. Conforme disminuye la temperatura, el esfuerzo continúa en aumento hasta que se completa el ciclo cuando se alcanza la temperatura ambiente. Se muestra un segundo ciclo térmico. Los ciclos de temperatura subsecuentes serán similares en forma, dado que la microestructura de la película no cambia, a menos que la temperatura más alta exceda la del ciclo previo.

¡Observe que el esfuerzo que soporta el aluminio a temperatura ambiente después del proceso cíclico es de 380 MPa! El aluminio voluminoso puro (aluminio con dimensiones macroscópicas) sólo puede soportar una fracción de este esfuerzo sin fallar. Por lo tanto, se ha observado una tendencia general en la ciencia de materiales: ¡en los metales cristalinos, más pequeño es más resistente!

En general, la clave de la resistencia de un metal cristalino son las dislocaciones. A medida que la resistencia al movimiento de las dislocaciones se incrementa, la resistencia del metal también lo hace. Un mecanismo para fortalecer los metales cristalinos a micro y nanoescala es el tamaño de los granos que, en las películas delgadas, tiende a estar en el orden del grosor de la película, como se muestra en la figura 6-27*a*). A medida que disminuye el tamaño de los granos, aumenta la resistencia a la fluencia (vea el capítulo 4, sección 7, si desea una explicación de la ecuación de Hall-Petch).

Las dislocaciones distorsionan el cristal circundante, lo que incrementa la energía de la deformación en los enlaces atómicos. Por lo tanto, las dislocaciones tienen energías asociadas con ellas. En todos los metales, a medida que aumenta la densidad de las dislocaciones (o la cantidad de la longitud de las dislocaciones por unidad de volumen en el cristal), aumenta esta energía.

En las películas delgadas, las dislocaciones pueden confinarse en la interfase entre la película delgada y el sustrato al que está enlazado. Por lo tanto, es necesario que la longitud de la dislocación aumente a lo largo de la interfase para que se propague y para que la película delgada se deforme de manera plástica. El incremento de la longitud de las dislocaciones requiere energía y el esfuerzo que se necesita para provocar que la dislocación se propague es mayor que la que se requiere para generar una dislocación que no está restringida por una interfase. Este esfuerzo es inversamente proporcional al grosor de la película; por lo tanto, a medida que disminuye el grosor de la película, aumenta la resistencia. Cuando dos superficies restringen la dislocación, como cuando una capa pasivada (es decir, una que protege la superficie de la película delgada de la oxidación o corrosión) se deposita sobre la película delgada, el efecto es aún más pronunciado. Esta relación inversa entre la resistencia y el grosor de la película es independiente del efecto de los tamaños de los granos explicado antes. Recuerde: cualquier mecanismo que interfiere con el movimiento de las dislocaciones le otorga más resistencia al metal.

Para inducir un cambio de forma no uniforme en un material, como la flexión de una barra o la indentación de un material, deben introducirse dislocaciones en la estructura cristalina. A tales dislocaciones se les llama *dislocaciones geométricamente necesarias*. Estas dislocaciones existen al margen de las dislocaciones (conocidas como *dislocaciones estadísticamente almacenadas*) que son producidas por una deformación homogénea; por ello, se incrementa la densidad de las dislocaciones. A escalas de longitud pequeñas (como de las indentaciones pequeñas que se hacen mediante un nanopenetrador), la densidad de las dislocaciones geométricamente necesarias es significativa, pero a escalas de longitud mayores, el efecto disminuye. Por lo tanto, la dureza de las indentaciones poco profundas es mayor que la que exhiben las indentaciones profundas hechas en el mismo material. Como aprenderá en el capítulo 8, a medida que la aumenta densidad de las dislocaciones, la resistencia de un metal se incrementa. Las dislocaciones actúan como obstáculos para la propagación de otras dislocaciones, y de nuevo cualquier mecanismo que interfiere con el movimiento de las dislocaciones otorga mayor resistencia al metal.

Un experimento de prueba mecánico, cuyo uso se incrementa de manera notable involucra fabricar especímenes de compresión con diámetro del orden de 1 micrón, utilizando una herramienta

conocida como haz enfocado de iones. En esencia, se utiliza un haz de iones galio para sustraer átomos de la superficie de un material, lo cual desarrolla un proceso mecanizado a la escala de longitud micrónica y submicrónica. Estos especímenes se deforman después bajo compresión en un nanopenetrador utilizando una punta de golpeo plana. El volumen de tales especímenes está en el orden de 2.5 μm^3. Se han observado resistencias extraordinarias en pilares ϕ monocristalinos hechos de metales. Este tema es un área de investigación activa en la comunidad de materiales.

6-13 Reología de los líquidos

Las descripciones de esfuerzo y deformación que hemos desarrollado hasta este momento se aplican comúnmente a los sólidos. La **reología** es el estudio de la deformación y el flujo de los materiales, en particular, de los líquidos. Si la relación entre el esfuerzo cortante aplicado τ y la rapidez de deformación cortante ($\dot{\gamma}$) es lineal, se refiere a este material **newtoniano**. La pendiente del esfuerzo cortante en función de la curva de la velocidad de deformación constante en estado estacionario se define como la **viscosidad** (η) del material. El agua es un ejemplo de un material newtoniano. La siguiente relación define la viscosidad:

$$\tau = \eta\dot{\gamma} \tag{6-25}$$

Las unidades η son Pa · s (en el sistema SI) o poises (P) o g/(cm · s) en el sistema cgs. En algunas ocasiones se utiliza el término centipoises (cP), donde $1cP = 10^{-2}$ P. La conversión entre estas unidades es determinada por 1Pa · s = 10P = 1,000 cP.

La **viscosidad cinemática** (ν) se define como

$$\nu = \eta/\rho \tag{6-26}$$

donde la viscosidad (η) utiliza unidades de Pa · s y la densidad (ρ) emplea unidades de kg/m^3. Las unidades de viscosidad cinemática son los m^2/s. Observe que en inglés se emplea convencionalmente la ν como símbolo, tanto de la razón de Poisson como de la viscosidad cinemática. Es común utilizar el mismo símbolo para representar diferentes cantidades en la notación científica aunque puede resultar confuso.

En el caso de muchos materiales, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación cortante no es lineal. Estos materiales son **no newtonianos**. La relación del esfuerzo en función de la rapidez de deformación cortante en estado estacionario en estos materiales puede describirse como

$$\tau = \eta\dot{\gamma}^m \tag{6-27}$$

donde el exponente m es distinto de 1.

Los materiales no newtonianos pueden clasificarse como **adelgazados por corte** (o pseudoplásticos) o **engrosados por corte** (o dilatantes). La figura 6-28 muestra las relaciones entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante de distintos tipos de materiales. Si se toma la pendiente de la recta al unir el origen con cualquier punto de la curva, determinaremos la viscosidad aparente (η_{ap}), la cual depende de la rapidez de deformación constante como se muestra en la figura 6-29*a*). La viscosidad aparente de un material newtoniano permanecerá constante a pesar de que cambie la rapidez de deformación cortante. En los materiales adelgazados por corte, la viscosidad aparente disminuye con el incremento de la rapidez de deformación cortante. En los materiales engrosados, la viscosidad aparente aumenta con los incrementos de la rapidez de deformación cortante. Por ejemplo, si tiene una lata de pintura en un almacén, la rapidez de deformación cortante a la que está sujeta es muy pequeña, y la pintura se comporta como si fuera muy viscosa. Al usarla con una brocha, la pintura está sujeta a una rapidez de deformación cortante alta y se comporta ahora como si fuera bastante delgada o menos viscosa (es decir, presenta una viscosidad aparente pequeña). A este fenómeno se le conoce como comportamiento del adelgazamiento por corte. Algunos materiales tienen un comportamiento "plástico ideal". En ellos, el esfuerzo cortante no cambia con la rapidez de deformación cortante.

Muchos materiales se pueden modelar como **plásticos Bingham** y se definen por las siguientes ecuaciones:

$$\tau = G \cdot \gamma \text{ (cuando } \tau \text{ es menor que } \tau_{ys}) \tag{6-28}$$

$$\tau = \tau_{ys} + \eta\dot{\gamma} \text{ (cuando } \tau \geq \tau_{ys}) \tag{6-29}$$

Las figuras 6-29*b* y 6-29*c* ilustran ese comportamiento. En estas ecuaciones, τ_{ys} es la resistencia a la fluencia obtenida por medio de la interpolación de la información del esfuerzo cortante-rapidez de deformación cortante con la rapidez de deformación cortante de cero.

Definimos a la resistencia a la fluencia como el nivel de esfuerzo que debe superarse para que el material se deforme de manera plástica. La existencia de una resistencia de fluencia verdadera (en ocasiones conocida como esfuerzo de fluencia), no se ha comprobado sin ambigüedad en el caso de muchos plásticos y dispersiones como la pintura. Para comprobar la existencia

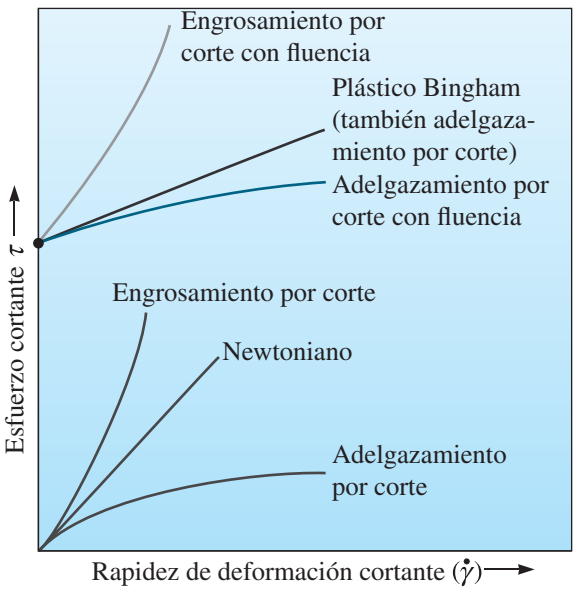


Figura 6-28 Relaciones esfuerzo cortante-rapidez de deformación cortante en materiales newtonianos y no newtonianos.

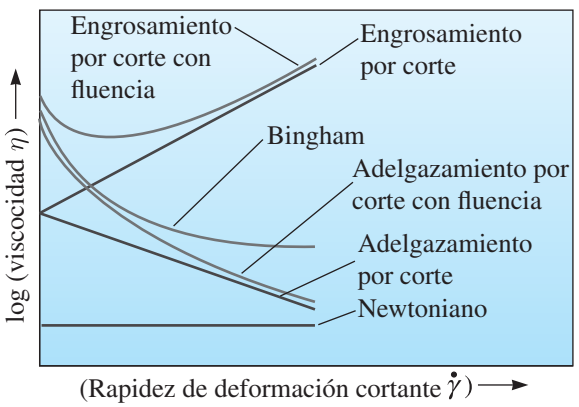
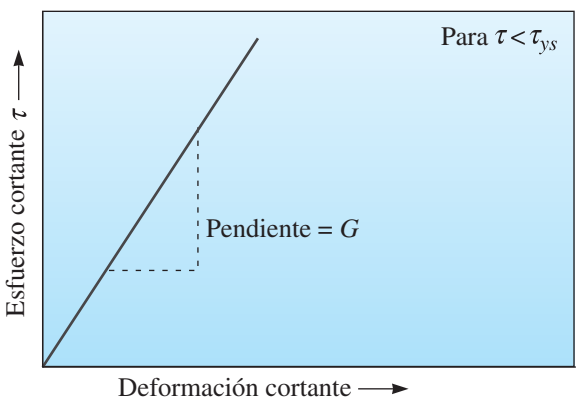
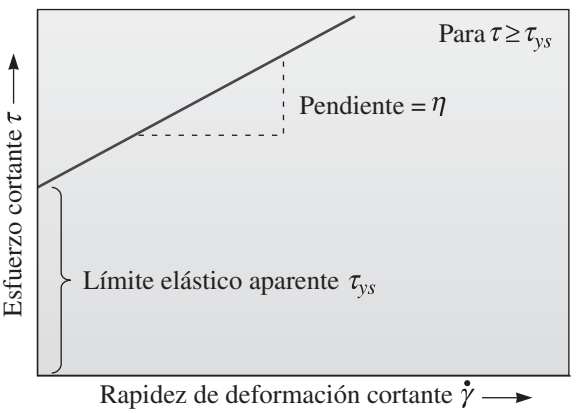


Figura 6-29 *a*) Viscosidad aparente en función de la rapidez de deformación cortante ($\dot{\gamma}$). *b*) y *c*) Ilustración de un plástico de Binghman (ecuaciones 6-28 y 6.29). Observe que el eje horizontal en *b*) es la deformación cortante.

b)



c)



de la fluencia, es necesario separar las mediciones del esfuerzo en función de la deformación. En estos materiales, una deformación crítica de fluencia puede ser una manera mejor de describir el comportamiento mecánico. Muchas lechadas cerámicas (dispersiones como las que se utilizan en el procesamiento de cerámicas), fundidos poliméricos (que se emplean para procesar polímeros), pinturas y geles, y productos alimenticios (yogurt, mayonesa, salsa de tomate, etc.) exhiben un comportamiento similar a los plásticos de Birgham. Observe que los plásticos de Bingham presentan un comportamiento de adelgazamiento por corte (es decir, la viscosidad aparente disminuye cuando aumenta la rapidez de deformación).

Los materiales adelgazados por corte también exhiben un **comportamiento tixotrópico** (por ejemplo, pinturas, lechadas cerámicas, fundidos de polímero, geles, etc.). Por lo general, estos materiales tixotrópicos contienen algún tipo de red de partículas o moléculas. Cuando se aplica una deformación cortante lo suficientemente grande (es decir, mayor que la deformación crítica de fluencia), la red o estructura tixotrópica se rompe y el material comienza a fluir. A medida que el corte se detiene, la red comienza a formarse de nuevo, y aumenta la resistencia al flujo. Los arreglos de partículas o moleculares en la red recién formada son distintos de aquellos de la red original. Por lo tanto, se dice que el comportamiento de los materiales tixotrópicos depende del tiempo y del historial de deformación. Algunos materiales muestran un incremento de la viscosidad aparente como una función del tiempo y a una rapidez de corte constante. Estos materiales se conocen como **reopécticos**.

Las propiedades reológicas de los materiales se determinan por medio de instrumentos conocidos como viscosímetros o *reómetros*. En estos instrumentos, se aplica un esfuerzo o una rapidez de deformación constante al material que se evalúa, para lo que se emplean diferentes arreglos geométricos (por ejemplo, de cono y placa, de placa paralela, de Couette, etc.)

Resumen

- El comportamiento mecánico de los materiales es descrito por sus propiedades mecánicas, las cuales se miden con pruebas sencillas idealizadas. Estas pruebas se diseñan para representar distintos tipos de condiciones de carga. Las propiedades de un material reportadas en varios manuales son los resultados de estas pruebas. En consecuencia, siempre debe recordarse que los valores de los manuales son resultados promedio que se obtienen a partir de pruebas idealizadas y, por lo tanto, deben utilizarse con cuidado.
- La prueba de tensión describe la resistencia de un material a un esfuerzo de tensión aplicado de manera lenta. Las propiedades importantes incluyen la resistencia a la fluencia (el esfuerzo al que el material comienza a deformarse de manera permanente), la resistencia a la tensión (el esfuerzo que corresponde a la carga aplicada máxima), el módulo de elasticidad (la pendiente de la porción elástica de la curva de esfuerzo-deformación) y los porcentajes de elongación y de reducción en el área (ambas medidas de la ductilidad del material).
- La prueba de flexión se utiliza para determinar las propiedades de tensión de los materiales quebradizos. Puede obtenerse un módulo de elasticidad y una resistencia a la flexión (similar a una resistencia a la tensión).
- La prueba de dureza, que mide la resistencia de un material a la penetración, proporciona una medida de la resistencia al desgaste y a la abrasión del material. Por lo general se utilizan diversas pruebas de dureza, entre ellas las de Rockwell y de Brinell. Con frecuencia, la dureza puede correlacionarse con las demás propiedades mecánicas, en particular con la resistencia a la tensión.
- La nanoindentación es una técnica de prueba de dureza que mide de manera continua la carga impuesta y el desplazamiento con una resolución de micronewton y subnanométrica, respectivamente. Las técnicas de nanoindentación son importantes para medir las propiedades mecánicas de las películas delgadas en sustratos y materiales en nanofase y la deformación de estructuras a micro y nanoescala que se sitúan de manera libre. La dureza y el módulo elástico se miden por medio de la nanoindentación.
- La prueba de impacto describe la respuesta de un material a una carga que se aplica de manera rápida. Las más comunes son las pruebas de Charpy y de Izod. Se mide la energía que se requiere para fracturar el espécimen y puede utilizarse como la base para comparar varios metales probados en las mismas condiciones. Además, puede determinarse una temperatura de transición sobre la cual el material falla de una manera dúctil, en lugar de una quebradiza.

- Los vidrios metálicos son metales amorfos. Como tales, no contienen dislocaciones. La falta de dislocaciones genera resistencias altas y ductilidades bajas en estos materiales.
- Los metales cristalinos exhiben resistencias más altas cuando sus dimensiones se confinan a micro y nanoescala. El comportamiento mecánico dependiente del tamaño tiene implicaciones críticas para el diseño y la confiabilidad de los materiales en aplicaciones de nanotecnología.
- La reología es el estudio de la deformación y el flujo de materiales, en particular, de los líquidos. El flujo de los líquidos puede clasificarse como newtoniano (cuando el esfuerzo cortante es lineal en relación con la velocidad de deformación constante) o no newtoniano.

Glosario

Adelgazamiento por corte (pseudoplásticos) Materiales en los que la viscosidad aparente disminuye cuando se incrementa la rapidez cortante.
Carga Fuerza que se aplica a un material durante una prueba.
Carga de impacto Aplicación de un esfuerzo a una velocidad de deformación muy alta ($\sim$>100 s^{-1}).
Comportamiento reopéctico Materiales que muestran engrosamiento por corte y también una viscosidad aparente que a una rapidez constante cortante aumenta con el tiempo.
Comportamiento tixotrópico Materiales que muestran adelgazamiento por corte y también una viscosidad aparente que a una rapidez de corte constante disminuye con el tiempo.
Deformación elástica Deformación de un material recuperable por completo y de manera instantánea.
Deformación ingenieril Elongación por unidad de longitud calculada utilizando las dimensiones originales.
Deformación o deformación plástica Deformación permanente de un material cuando se le aplica una carga y después se elimina.
Deformación unitaria Elongación por unidad de longitud.
Deformación unitaria elástica Deformación del material que se recupera de manera instantánea cuando se elimina la carga aplicada.
Deformación verdadera Elongación por unidad de longitud calculada cuando se utilizan las dimensiones instantáneas.
Deformímetro Dispositivo que se utiliza para medir la deformación. Por lo general, un deformímetro consiste en un alambre fino incrustado en una matriz de polímero. El calibrador de deformación se enlaza al espécimen de prueba y se deforma a medida que el espécimen también lo hace. A medida que el alambre del deformímetro se deforma, su resistencia cambia. Esta modificación de la resistencia es directamente proporcional a la deformación.
Dilatante (engrosamiento por corte) Materiales en los cuales la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la rapidez cortante.
Ductilidad Capacidad de un material para deformarse de manera permanente sin romperse cuando se le aplica una fuerza.
Elastómeros Plásticos naturales o sintéticos conformados por moléculas con enrollados parecidos a un resorte que generan deformaciones elásticas grandes (por ejemplo, el caucho natural y las siliconas).
Energía de impacto Energía que se requiere para fracturar un espécimen estándar cuando la carga se aplica de manera repentina.
Engrosamiento por corte (dilatante) Materiales en los que la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la rapidez de deformación cortante.
Esfuerzo Fuerza por unidad de área sobre la que actúa la fuerza.
Esfuerzo ingenieril Carga, o fuerza, que se aplica dividida entre el área original sobre la que actúa la carga.
Esfuerzo verdadero Carga dividida entre el área instantánea sobre la que actúa la carga.
Extensómetro Instrumento para medir el cambio de longitud de un espécimen de tensión, lo que permite el cálculo de la deformación. Con frecuencia, los extensómetros son clips que se unen a una muestra y se deforman de manera elástica para medir el cambio en longitud.
Estricción Deformación local que provoca la reducción del área de la sección transversal de un espécimen bajo tensión. Muchos materiales dúctiles muestran este comportamiento. El esfuerzo ingenieril comienza a disminuir al inicio de la estricción.
Fenómeno del punto de fluencia Transición abrupta, que se observa en algunos materiales, de la deformación elástica al flujo plástico.
Ley de Hooke Relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en la parte elástica de la curva de esfuerzo-deformación.
Límite elástico Magnitud del esfuerzo a la que comienza la deformación plástica.
Límite proporcional Nivel de esfuerzo sobre el cual la relación entre el esfuerzo y la deformación no es lineal.

Macrodureza Dureza del volumen de los materiales que se mide utilizando cargas > 2 N.

Material anelástico (viscoelástico) Material en el que la deformación total que desarrolla tiene componentes elástico y viscoso. Parte de la deformación total se recupera de manera similar a la deformación elástica. Sin embargo, otra parte se recupera después de un cierto periodo. Los ejemplos de materiales viscoelásticos incluyen los polímeros fusionados y muchos otros, entre ellos, el Silly Putty®. Por lo regular, el término anelástico se utiliza para designar materiales metálicos.

Material viscoelástico (o anelástico) Vea Material anelástico.

Material viscoso Material en el que se desarrolla una deformación por un periodo y que no regresa a su forma original después de que se elimina el esfuerzo.

Microdureza Dureza de materiales medida por lo general utilizando cargas menores de 2 N con una prueba como la de Knoop (DK).

Módulo cortante Pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo cortante-deformación cortante.

Módulo de elasticidad Módulo de Young, o pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo-deformación en la región elástica. Medida de la rigidez de los enlaces de un material, que no depende en gran medida de la microestructura.

Módulo de flexión Módulo de elasticidad que se calcula a partir de los resultados de una prueba de flexión; es proporcional a la pendiente de la curva de esfuerzo-deflexión.

Módulo de resiliencia Energía elástica máxima que absorbe un material cuando se le aplica una carga.

Módulo de Young Pendiente de la parte lineal de la curva de esfuerzo-deformación en la región elástica, lo mismo que el módulo de elasticidad.

Nanoindentación Prueba de dureza que se lleva a cabo a una escala de longitud nanométrica. La carga impuesta y el desplazamiento se miden con una resolución de micronewton y subnanómetros, respectivamente.

Newtonianos Materiales en los que el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante están linealmente relacionados (por ejemplo, aceite ligero o agua).

No newtonianos Materiales en los que el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación cortante no están linealmente relacionados; estos materiales son adelgazados o engrosados por corte (por ejemplo, polímeros fusionados, lechadas, pinturas, etcétera).

Plástico de Bingham Material con una respuesta mecánica dada por $\tau = G\gamma$ cuando $\tau < \tau_{ys}$ y $\tau = \tau_{ys} + \eta\dot{\gamma}$ cuando $\tau \geq \tau_{ys}$.

Porcentaje de elongación Incremento permanente porcentual total de la longitud de un espécimen debido a una prueba de tensión.

Porcentaje de reducción del área Disminución permanente porcentual total del área de la sección transversal de un espécimen debido a una prueba de tensión.

Procesamiento de deformación Métodos de maquinación o fabricación que se utilizan para moldear los materiales (por ejemplo, extrusión, forjado).

Prueba de dureza Mide la resistencia de un material a la penetración por un objeto afilado. Las pruebas de dureza comunes incluyen la prueba de Brinell, la de Rockwell, la de Knoop y la de Vickers.

Prueba de flexión Aplicación de una fuerza al centro de una barra soportada en cada extremo para determinar la resistencia de un material a una carga estática o aplicada de manera lenta. Por lo general se utiliza para materiales quebradizos.

Prueba de impacto Mide la capacidad de un material para absorber la aplicación repentina de una carga sin romperse. Las pruebas de impacto que más se utilizan son las de Charpy y de Izod.

Prueba de tensión Mide la respuesta de un material a una fuerza uniaxial que se aplica lentamente. Se obtiene la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y la ductilidad.

Pseudoplásticos (adelgazamiento por corte) Materiales en los que la viscosidad aparente disminuye con el incremento de la velocidad de corte.

Rapidez de deformación cortante Derivada del tiempo de la deformación cortante. Vea "Rapidez de deformación".

Rapidez de deformación Velocidad a la que se desarrolla la deformación en o es aplicada a un material indicado; se representa por medio de $\dot{\varepsilon}$ o $\dot{\gamma}$ para las velocidades de deformación de tensión y cortante, respectivamente. La rapidez de deformación puede tener efecto sobre un material, ya sea que se comporte de una manera dúctil o quebradiza.

Razón de Poisson Negativo de la razón entre las deformaciones lateral y longitudinal de la región elástica.

Relajación del esfuerzo Disminución del esfuerzo de un material sostenido bajo deformación constante como una función del tiempo, la cual se observa en los materiales viscoelásticos. La relajación del esfuerzo es distinta de la recuperación dependiente del tiempo de deformación.

Resistencia a la flexión (módulo de ruptura) Esfuerzo que se requiere para fracturar un espécimen en una prueba de flexión.

Resistencia a la fluencia Valor del esfuerzo que se obtiene de manera gráfica, que describe no más de una cantidad específica de deformación (por lo general, de 0.002). También se le conoce como resistencia a la fluencia compensada.

Resistencia a la fluencia compensada Valor del esfuerzo que se obtiene de manera gráfica que describe el esfuerzo que no da más que una cantidad específica de deformación plástica. También, enunciado de manera sencilla como resistencia a la fluencia.

Resistencia a la tensión Esfuerzo que corresponde a la carga máxima en una prueba de tensión. Resistencia máxima a la tensión extrema (RMT). Vea "Resistencia a la tensión".

Rigidez Medida de la resistencia a la deformación elástica de un material. La rigidez es la pendiente de una curva de carga-desplazamiento, proporcional al módulo elástico. La rigidez depende de la geometría del componente que se considere, mientras que el módulo elástico o de Young es una propiedad del material.

Sensibilidad a la muesca Mide el efecto de una muesca, rayón u otra imperfección sobre las propiedades de un material como la tenacidad o la vida a la fatiga.

Temperatura de transición de dúctil a quebradizo Temperatura debajo de la cual un material se comporta de manera quebradiza en una prueba de impacto; también depende de la rapidez de deformación.

Temperatura de transición vítrea Temperatura debajo de la cual un material que de otra manera sería dúctil se comporta como si fuera quebradizo. Por lo general, esta temperatura no es fija y es afectada por el procesamiento del material.

Tenacidad a la fractura Resistencia de un material a fallar en presencia de un defecto.

Tenacidad a la tensión Área bajo la curva de la prueba de tensión de esfuerzo verdadero-deformación verdadera. Medida de la energía que se requiere para provocar la fractura bajo las condiciones de la prueba de tensión.

Tenacidad de impacto Energía que absorbe un material, por lo general con una muesca, durante la fractura, bajo las condiciones de la prueba de impacto.

Trabajo de fractura Área bajo la curva de esfuerzo-deformación, considerado como una medida de la tenacidad a la tensión.

Valor de deformación compensado Valor de la deformación (por ejemplo, 0.002) que se utiliza para determinar el esfuerzo a la fluencia compensada.

Viscosidad Medida de la resistencia al flujo, definida como la razón del esfuerzo cortante a la rapidez de deformación cortante (unidades de Poise o Pa-s).

Viscosidad aparente Viscosidad que se obtiene al dividir el esfuerzo cortante entre el valor correspondiente de la rapidez de deformación cortante de ese esfuerzo.

Viscosidad cinemática Razón de la viscosidad y la densidad, con frecuencia expresada en centistokes.

Problemas

Sección 6-1 Importancia tecnológica

6-1 Explique la función de las propiedades mecánicas de las aplicaciones de soporte de carga por medio de ejemplos reales.

6-2 Explique la importancia de las propiedades mecánicas de las aplicaciones funcionales (por ejemplo, ópticas, magnéticas, electrónicas, etc.) utilizando ejemplos reales.

6-3 Explique la importancia de comprender las propiedades mecánicas en el procesamiento de materiales.

Sección 6-2 Terminología de las propiedades mecánicas

6-4 Defina "esfuerzo ingenieril" y "deformación ingenieril".

6-5 Defina "módulo de elasticidad".

6-6 Defina "deformación plástica" y compárela con la "deformación elástica".

6-7 ¿Qué es la velocidad de deformación? ¿Cómo afecta al comportamiento mecánico de los materiales poliméricos y metálicos?

6-8 ¿Por qué el Silly Putty® se rompe cuando se estira de manera rápida?

6-9 ¿Qué es un material viscoelástico? Proporcione un ejemplo.

6-10 ¿Qué es un elastómero? Proporcione un ejemplo.

6-11 ¿A qué se refiere el término "relajación del esfuerzo"?

6-12 Dibuje un diagrama esquemático que muestre el desarrollo de una deformación de un material elástico y viscoelástico. Suponga que la carga se aplica a algún tiempo $t = 0$ y se retira a algún tiempo t.

Sección 6-3 Prueba de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación unitaria

6-13 Dibuje las curvas cualitativas de esfuerzo ingenieril- deformación ingenieril de un polímero dúctil, un metal dúctil, una cerámica, un vidrio y un caucho natural. Etiquete los diagramas de manera cuidadosa. Explique su diagrama de cada material.

6-14 Calcule la fuerza máxima que una barra de Al_2O_3 con 5.08 mm de diámetro y resistencia a la fluencia de 241 MPa podrá soportar sin deformarse. Exprese su resultado en lbs y N.

6-15 Un espécimen cilíndrico de aleación de titanio con módulo elástico de 107 GPa y 3.8 mm de diámetro original experimentará una deformación elástica al aplicarle una carga de tensión de 2,000 N. Calcule la longitud máxima que alcanzará el espécimen si la elongación máxima permisible es de 0.42mm.

6-16 Un material de 8 mm de diámetro es jalado con una fuerza de 2,500 N. Calcule el esfuerzo. Si la longitud original es de 50 mm, ¿cuál es la deformación bajo la carga si se alarga a 50.15 mm?

6-17 Una placa de aluminio de 0.5 cm de grosor tiene que soportar una fuerza de 50,000 N sin deformación permanente. Si el aluminio tiene una resistencia a la fluencia de 125 MPa, ¿cuál es el ancho mínimo de la placa?

Sección 6-4 Propiedades que se descubren a partir de la prueba de tensión y sección 6-5 Esfuerzo verdadero y deformación verdadera

6-18 Se aplica una fuerza de 3,780 N a un alambre de níquel de 3.81 mm de diámetro que tiene una resistencia a la fluencia de 310 MPa y una resistencia a la tensión de 379.2 MPa. Determine
a) si el alambre se deformará de manera plástica y
b) si el alambre experimentará estricción.

6-19 Se aplica una fuerza de 100,000 N a una barra de hierro con un área de sección transversal de 10×20 mm que tiene una resistencia a la fluencia de 400 MPa y una resistencia a la tensión de 480 MPa. Determine
a) si la barra se deformará de manera plástica y
b) si la barra experimentará estricción.

6-20 Defina "esfuerzo verdadero" y "deformación verdadera". Compárelos con el esfuerzo ingenieril y la deformación ingenieril.

6-21 ¿En qué punto suele iniciar la estricción en una prueba de tensión?

6-22 Escriba las fórmulas para calcular el esfuerzo y la deformación de una muestra sujeta a una prueba de tensión. Suponga que la muestra presenta estricción.

6-23 Deduzca la expresión $\varepsilon = \ln(1 + e)$, donde ε es la deformación verdadera y e es la deformación ingenieril. Observe que esta expresión no es válida después del inicio la estricción.

6-24 ¿Qué es la estricción? ¿Cómo conduce a la reducción del esfuerzo ingenieril a medida que aumenta el esfuerzo verdadero?

6-25 Dos barras en forma de monocristal de estaño puro presentan límites elásticos significativamente diferentes a 0.2% de valor de deformación compensado. ¿Cuál podría ser la causa de este fenómeno?

6-26 Desarrolle una expresión de la deformación ingenieril junto al eje de carga de una barra sujeta a tensión antes de presentar estricción. Su expresión debe ser una función de los valores de los diámetros inicial e instantáneo. Suponga que el volumen es constante.

6-27 El cable de un elevador tiene un área de sección transversal de 80 mm^2. El elevador se usa para levantar una caja de pesaje de 500 kg. La longitud libre del cable es de 30 m. Suponga que toda deformación es elástica.
a) ¿Cuál es el esfuerzo sobre el cable?
b) ¿Qué tanto se extenderá el cable si está hecho de acero ($E = 200$ GPa)?
c) ¿Qué tanto se extenderá el cable si está hecho de polipropileno ($E = 1.2$ GPa)?

6-28 Una fuerza de 20,000 N ocasionará que una barra de magnesio de 1 cm $\times$ 1 cm se estire de 10 a 10.045 cm. Calcule el módulo de elasticidad, en GPa y en psi.

6-29 Las dimensiones de una barra de polímero son 25.4 mm $\times$ 50.8 mm $\times$ 381 mm. El polímero tiene un módulo de elasticidad de 4.14 GPa. ¿Qué fuerza se requiere para estirar la barra de manera elástica de 381 mm a 387.4 mm?

6-30 Un cable de acero de 31.75 mm de diámetro y 15.24 m de largo va a levantar una carga de 20,000kg sin sufrir deformación permanente. ¿Cuál es la longitud del cable durante el levantamiento? El módulo de elasticidad del acero es de 207 MPa.

6-31 *a*) Los nanotubos de carbono son uno de los materiales más rígidos y resistentes conocidos por los científicos e ingenieros. Los nanotubos de carbono tienen un módulo elástico de 1.1 TPa (1 TPa = 10^{12} Pa). Si un nanotubo de carbono tiene un diámetro de 15 nm, determine el esfuerzo ingenieril que soporta cuando se sujeta a una carga de tensión de 4 μN (1 μN = 10^{-6} N) a lo largo de la longitud del tubo. Suponga que toda el área de la sección transversal del nanotubo es de soporte de carga.
b) Suponga que el nanotubo de carbono sólo se deforma de manera elástica (no de manera plástica) bajo la carga de 4 μN. El nanotubo tiene una longitud de 10 μN (1 μN = 10^{-6} m). ¿Cuál es la elongación de tensión (desplazamiento) del nanotubo de carbono en nanómetros (1 nm = 10^9 m)?

6-32 Se aplica una fuerza de 17.8 kN a una barra cilíndrica de metal de 12.83 mm de diámetro. Esta carga produce una reducción del diámetro

de 7.62 μm. La deformación es elástica pura. ¿Cuál es la razón de Poison de este material si su módulo elástico es 103.4 GPa?

6-33 Una barra cilíndrica de acero de 10 mm de diámetro se deformará elásticamente cuando se le aplica una fuerza junto al eje de la barra (carga axial). Determine la fuerza que producirá una reducción elástica de diámetro de 0.003 mm. La razón de Poison del acero carbonado es de 0.30 y su módulo de elasticidad es de 207 GPa.

6-34 *a*) Una barra de titanio de 10.2 mm de diámetro y 305 mm de largo tiene una resistencia a la fluencia de 345 MPa, un módulo de elasticidad de 110 GPa y una razón de Poisson de 0.30. Determine la longitud y el diámetro de la barra cuando se aplica una carga de 2,224 N.

b) Cuando se aplica una carga de tensión a una barra de cobre de 15 mm de diámetro, este se reduce a 14.98 mm. Determine la carga aplicada utilizando la información de la tabla 6-3.

6-35 Se recolectó la siguiente información a partir de una barra de tensión de 12.83 mm de diámetro que fue mecanizada a 50.8 mm de longitud calibrada a partir de una aleación de cobre-níquel.

Carga (kN)	Longitud calibrada (mm)
0	50.8
4.448	50.81
8.90	50.823
13.34	50.835
17.86	50.851
26.68	51.308
35.60	52.1208
44.48	53.645
48.93	57.912 (carga máxima)
40.03	69.85 (fractura)

Después de la fractura, la longitud calibrada fue de 69.85 mm y el diámetro de 9.271 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y calcule:

a) la resistencia a la fluencia compensada a 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el porcentaje de elongación;
e) el porcentaje de reducción del área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura
g) el esfuerzo verdadero en la estricción, y
h) el módulo de resiliencia.

6-36 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen AISI-SAE tipo 416 de acero inoxidable de 12.83 mm de diámetro con una longitud inicial calibrada de 50.8 mm:

Carga (kN)	Longitud calibrada (mm)
0	50.8
12.68	50.825
25.40	50.851
38.08	50.876
50.71	50.902
76.06	50.952
89.00	51.003
92.52	51.054
102.3	51.181
107.8	51.308
119.2	51.562
128.1	51.816
149.7	52.832
159.1	53.848
160.1	54.356 (carga máxima)
159.5	54.864
151.5	55.88
124.5	56.642 (fractura)

Después de la fractura, la longitud calibrada fue de 55.885 mm y el diámetro de 82.55 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y calcule:

a) la resistencia a la fluencia compensada a 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el porcentaje de elongación;
e) el porcentaje de reducción del área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura
g) el esfuerzo verdadero en la estricción
h) el módulo de resiliencia, y
i) las deformaciones elástica y plástica en la fractura
j) Cuando se cargó la muestra con 50.7 kN, su diámetro medía 12.80mm. Calcule las deformaciones axial y transversal con esta carga. Calcule la razón de Poison.
k) Investigue las propiedades de tensión del acero inoxidable tipo 416 cuando ha sido enfriado y templado, y compárelo con sus respuestas. Analice las similitudes y diferencias.

6-37 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba estándar de latón laminado en frío y recocido. El espécimen tenía una longitud inicial calibrada l_0 de 35 mm y un área inicial de la sección transversal A_0 de 10.5 mm^2.

Carga (N)	Δl (mm)
0	0.0000
66	0.0112
177	0.0157
327	0.0199
462	0.0240
797	1.72
1350	5.55
1720	8.15
2220	13.07
2690	22.77 (carga máxima)
2410	25.25 (fractura)

a) Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y la curva de esfuerzo-deformación verdaderos. Dado que el área de la sección transversal instantánea del espécimen se desconoce después del punto de estricción, trunque la información de esfuerzo verdadero-deformación verdadera en el punto que corresponde a la resistencia a la tensión máxima. Se recomienda el uso de un software graficador.
b) Comente sobre los valores relativos de esfuerzo-deformación verdaderos y de esfuerzo-deformación ingenieriles durante la carga elástica y antes de la estricción.
c) Si la información de esfuerzo-deformación verdaderos se conociera después del punto de estricción, ¿cómo sería la curva?
d) Calcule la resistencia a la fluencia compensada a 0.2%.
e) Calcule la resistencia a la tensión.
f) Calcule el módulo elástico utilizando el ajuste lineal de la información apropiada.

6-38 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba estándar de una aleación de cobre de 12.833 mm de diámetro (l_0 = 50.8 mm):

Carga (kN)	Δl (pulg.)
0	0.00000
13.34	0.04242
26.68	0.08458
33.36	0.10592
40.03	0.2286
46.71	1.016
53.38	6.604
55.16	12.7 (carga máxima)
50.71	25.908 (fractura)

Después de la fractura la longitud total era de 76.556 mm y el diámetro de 9.5 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y calcule
a) la resistencia a la fluencia compensada a 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el porcentaje de elongación;
e) el porcentaje de reducción del área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura,
g) el esfuerzo verdadero en la estricción y
h) el módulo de resiliencia.

6-39 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba de cloruro de polivinilo de 10.16 mm de diámetro (l_0 = 50.8 mm):

Carga (kN)	Δl (mm)
0	0.00000
1.334	0.1895
2.668	0.38
4.003	0.603
5.34	0.813
6.67	1.168
7.38	1.778 (carga máxima)
7.12	2.388
6.316	3.048 (fractura)

Después de la fractura la longitud total era de 53.086 mm y el diámetro de 9.982 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y calcule
a) la resistencia a la fluencia compensada a 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el porcentaje de elongación;
e) el porcentaje de reducción del área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura, y
g) el módulo de resiliencia.

6-40 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba de magnesio de 12 mm de diámetro (l_0 = 30.00 mm):

Carga (N)	Δl (mm)
0	0.0000
5,000	0.0296
10,000	0.0592
15,000	0.0888
20,000	0.15
25,000	0.51
26,500	0.90
27,000	1.50 (carga máxima)
26,500	2.10
25,000	2.79 (fractura)

Después de la fractura, la longitud total era de 32.61 mm y el diámetro de 11.74 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y calcule

a) la resistencia a la fluencia compensada a 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad;
d) el porcentaje de elongación;
e) el porcentaje de reducción del área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura;
g) el esfuerzo verdadero en la estricción y
h) el módulo de resiliencia.

6-41 Se recolectó la siguiente información a partir de un espécimen de prueba de un hierro colado dúctil de 20 mm de diámetro (l_0 = 40.00 mm):

Carga (N)	Δ*l* (mm)
0	0.0000
5,000	0.0296
10,000	0.0592
15,000	0.0888
20,000	0.15
25,000	0.51
26,500	0.90
27,000	1.50 (carga máxima)
26,500	2.10
25,000	2.79 (fractura)

Después de la fractura, la longitud total era de 47.42 mm y el diámetro de 18.35 mm. Grafique la curva de esfuerzo-deformación ingenieriles y la curva de esfuerzo-deformación verdaderos y calcule

a) la resistencia a la fluencia compensada a 0.2%;
b) la resistencia a la tensión;
c) el módulo de elasticidad, utilizando el ajuste lineal a la información apropiada;
d) el porcentaje de elongación;
e) el porcentaje de reducción del área;
f) el esfuerzo ingenieril en la fractura;
g) el esfuerzo verdadero en la estricción y
h) el módulo de resiliencia.

6-42 Considere los diagramas de esfuerzo-deformación de tensión en la figura 6-30 etiquetados 1 y 2. Estos diagramas son comunes de los metales. Responda las siguientes preguntas y considere cada inciso como una pregunta independiente que no tiene relación con los incisos anteriores.

a) Las muestras 1 y 2 son idénticas, a excepción del tamaño de los granos. ¿Cuál muestra tiene los granos más pequeños? ¿Cómo lo sabe?
b) Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que se probaron a temperaturas diferentes. ¿Cuál fue probada a una temperatura menor? ¿Cómo lo sabe?
c) Las muestras 1 y 2 son materiales diferentes. ¿Cuál es la más tenaz? Explique su respuesta.
d) Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que una de ellas es un metal puro y la otra tiene un porcentaje menor de aleación. ¿Cuál muestra ha sido aleada? ¿Cómo lo sabe?
e) Dadas las curvas de esfuerzo-deformación de los materiales 1 y 2, ¿cuál material tiene el menor valor de dureza en la escala de dureza de Brinell? ¿Cómo lo sabe?
f) ¿Las curvas de esfuerzo-deformación que se muestran son curvas de esfuerzo-deformación verdaderos o de esfuerzo-deformación ingenieriles? ¿Cómo lo sabe?
g) ¿Cuál de los dos materiales que se representan por las muestras 1 y 2 mostraría una resistencia a la fluencia cortante mayor? ¿Cómo lo sabe?

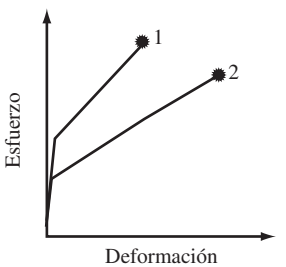


Figura 6-30 Curvas de esfuerzo-deformación del problema 6-42.

Sección 6-6 Prueba de flexión de materiales quebradizos

6-43 Defina el término "resistencia a la flexión" y "módulo de flexión".

6-44 ¿Por qué con frecuencia se realiza una prueba de flexión sobre los materiales quebradizos?

6-45 Un espécimen cuadrado de MgO es cargado en una prueba de flexión de tres puntos. Calcule el grosor mínimo posible que debe tener el espécimen para no fracturarse si la carga que se aplica es de 422.6 N, la resistencia a la flexión es de 103.4 MPa y la separación entre los puntos de carga es de 50.8 mm.

6-46 Una barra de Al_2O_3 de 6.35 mm de grosor, 12.7 mm de ancho y 228.6 mm de largo se prueba

Fuerza (N)	Deflexión (mm)
64.5	0.0635
128.6	0.127
193.1	0.191
257.6	0.254
382.6	0.378 (fractura)

en un aparato de flexión en tres puntos con los soportes localizados a 152.4 mm. La deflexión del centro de la barra se mide como una función de la carga aplicada. La información se muestra abajo. Determine la resistencia a la flexión y el módulo de flexión.

6-47 Se lleva a cabo una prueba de flexión en tres puntos sobre un bloque de ZrO_2 de 203.2 mm de largo, 12.7 mm de ancho y 6.35 mm de grueso y que está sobre dos soportes a 101.6 mm. Cuando se aplica una fuerza de 1,780 N, el espécimen se flexiona 0.94 mm y se rompe. Calcule
a) la resistencia a la flexión y
b) el módulo de flexión, suponiendo que no ocurre ninguna deformación plástica.

6-48 Se desarrolla una prueba de flexión en tres puntos sobre un bloque de carburo de silicio de 100 mm de largo, 15 mm de ancho y 6 mm de grueso y que está sobre dos soportes a 75 mm. La muestra se rompe cuando se registra una deflexión de 0.09 mm. El módulo de flexión del carburo de silicio es de 480 GPa. Suponga que no ocurre ninguna deformación plástica. Calcule
a) la fuerza que provoca la fractura y
b) la resistencia a la flexión.

6-49 *a*) Se requiere que un polímero termoplástico que contiene cuentas de vidrio se flexione 0.5 mm cuando se le aplica una fuerza de 500 N. La parte de polímero es de 20 mm de ancho, 5 mm de grosor y 100 mm de largo. Si el módulo de flexión es de 6.9 GPa, determine la distancia mínima entre los soportes. ¿El polímero se fracturará si su resistencia a la flexión es de 85 MPa? Suponga que no ocurre ninguna deformación plástica.
b) El módulo de flexión de la alúmina es de 310 GPa y su resistencia a la flexión es de 317.2 MPa. Una barra de alúmina de 7.62 mm de grosor, 25.4 m de ancho y 254 mm de largo se coloca sobre soportes a 177.8 mm. Determine la cantidad de flexión en el momento en que la barra se rompe, suponiendo que no ocurre ninguna deformación plástica.

6-50 Las cerámicas son mucho más resistentes en compresión que en tensión. Explique la causa de ello.

6-51 Las dislocaciones tienen un efecto importante sobre la deformación plástica de los metales, pero no desempeñan una función importante en el comportamiento mecánico de las cerámicas. ¿Por qué?

6-52 ¿Qué controla la resistencia de las cerámicas y los vidrios?

Sección 6-7 Dureza de los materiales y sección 6-8 Nanoindentación

6-53 ¿Qué significa el término "dureza de un material"?

6-54 ¿Por qué la información de la dureza es difícil de correlacionar de una manera cuantitativa con las propiedades mecánicas de los materiales?

6-55 ¿Cuál es el material más duro (natural o sintético)? ¿El diamante?

6-56 Explique los términos "macrodureza" y "microdureza".

6-57 Una medición de la dureza de Brinell, en la cual se utiliza un penetrador de 10 mm de diámetro y una carga de 500 kg, produce una indentación de 2.5 mm sobre una placa de acero.
a) Determine el número de dureza de Brinell (DB) del metal.
b) Proponga una aproximación de la resistencia a la tensión del acero.

6-58 En una prueba de dureza de Brinell se emplean un indentador de 10 mm de diámetro y una carga de 500 kg, que producen una indentación de 4.5 mm en un plato de aluminio. Determine el número de dureza de Brinell (DB) del metal.

6-59 Cuando se aplica una carga de 3,000 kg a una esfera de 10 mm de diámetro en una prueba de Brinell de un acero, se produce una indentación de 3.1 mm. Calcule la resistencia a la tensión del acero.

6-60 ¿Por qué es necesario desarrollar calibraciones en patrón antes de llevar a cabo un experimento de nanoindentación?

6-61 El módulo elástico de un vidrio metálico se determina de 95 GPa utilizando una prueba de nanoindentación con una punta de Berkovich de diamante. La razón de Poisson del vidrio metálico es de 0.36. La rigidez de descarga se determina a partir de la información del desplazamiento de la carga como de 5.4×10^5 N/m. La carga máxima es de 120 mN. ¿Cuál es la dureza del vidrio metálico a esta profundidad de indentación?

6-62 En una prueba de nanoindentación que emplea una punta de diamante, se determina que el módulo elástico y la dureza del MgO son de 306 GPa y 9.2 GPa respectivamente. La razón de Poison del MgO es de 0.17 y la carga máxima a esta profundidad de indentación en particular es de 150 mN. Determine la rigidez de contacto S. Tome el valor de $\beta = 1$.

Sección 6-9 Efectos de la rapidez de deformación y comportamiento al impacto y sección 6-10 Propiedades que se descubren a partir de la prueba de impacto

6-63 Elabore una gráfica con los datos de muesca en V de Charpy para acero comercial que se mues-

tran a continuación. Etiquete los puntos de energía alta y baja en su gráfica. ¿Recomendaría emplear este acero para condiciones de servicio inferiores a los 10°C? Explique su respuesta.

Temperatura (°C)	Energía de impacto (J)
50	75
40	75
30	70
20	58
10	37
0	24
−10	15
−20	10
−30	4
−40	1

6-64 La siguiente información se obtuvo a partir de una serie de pruebas de impacto de Charpy llevadas a cabo sobre cuatro aceros, cada uno de los cuales tenía un contenido distinto de manganeso. Grafique la información y determine

a) la temperatura de transición de cada uno (definida por la media de las energías absorbidas en las regiones dúctil y quebradiza) y

b) la temperatura de transición de cada uno (definida como la temperatura que provee 50 J de energía absorbida).

Temperatura de la prueba (°C)	Energía de impacto (J)			
	0.30% Mn	0.39% Mn	1.01% Mn	1.55% Mn
−100	2	5	5	15
−75	2	5	7	25
−50	2	12	20	45
−25	10	25	40	70
0	30	55	75	110
25	60	100	110	135
50	105	125	130	140
75	130	135	135	140
100	130	135	135	140

6-65 Grafique la temperatura de transición en función del contenido de manganeso con base en la información del problema 6-64 y explique el efecto del manganeso sobre la tenacidad del acero. ¿Cuál es el manganeso mínimo permisible en el acero si se utilizará una parte a 0°C?

6-66 La siguiente información se obtuvo a partir de una serie de pruebas de impacto de Charpy llevadas a cabo sobre cuatro hierros colados dúctiles, cada uno con un contenido distinto de silicio. Grafique la información y determine

a) la temperatura de transición de cada uno (definida por la media de las energías absorbidas en las regiones dúctil y quebradiza) y

b) la temperatura de transición de cada uno (definida como la temperatura que provee 10 J de energía absorbida).

c) Grafique la temperatura de transición en función del contenido de silicio y explique el efecto del silicio sobre la tenacidad del hierro colado. ¿Cuál es el contenido de silicio máximo permisible en el hierro fundido si se va a utilizar una parte a 25°C?

Temperatura de la prueba (°C)	Energía de impacto (J)			
	2.55% Si	2.85% Si	3.25% Si	3.63% Si
−50	2.5	2.5	2	2
−5	3	2.5	2	2
0	6	5	3	2.5
25	13	10	7	4
50	17	14	12	8
75	19	16	16	13
100	19	16	16	16
125	19	16	16	16

6-67 Con frecuencia se recomiendan metales CCCa para su uso a temperaturas bajas, en particular cuando se espera alguna carga repentina de la parte. Explique por qué.

6-68 Una parte de acero puede fabricarse por medio de metalurgia de polvos (compactando las partículas de polvo de hierro y sinterizándolas para producir un sólido) o por medio de su maquinado a partir de un bloque de acero sólido. ¿Cuál parte se esperaría que tuviera la mayor tenacidad? Explique su respuesta.

6-69 ¿A qué se refiere con el término sensibilidad a la muesca?

6-70 ¿Cuál es la diferencia entre una prueba de tensión y una prueba de impacto? Utilizando esta información, explique por qué los valores de la tenacidad medidos mediante pruebas de impacto no siempre se pueden correlacionar con la tenacidad a la tensión medida utilizando pruebas de tensión.

6-71 Varias aleaciones de aluminio-silicio tienen una estructura que incluye placas con bordes agudos de silicio quebradizo en la matriz de aluminio blanda y más dúctil. ¿Esperaría que estas aleaciones fueran sensibles a la muesca en una prueba de impacto? ¿Esperaría que estas aleaciones tuvieran buena tenacidad? Explique sus respuestas.

6-72 ¿Qué es la temperatura de transición de dúctil a quebradizo (TTDQ)?

6-73 ¿Cómo se define la tenacidad a la tensión en relación con el diagrama de esfuerzo-deformación verdaderos? ¿Cómo se relaciona la tenacidad a la tensión con la tenacidad de impacto?

6-74 ¿Qué provocó el accidente del *Challenger* de la NASA en 1986?

6-75 ¿Qué factores contribuyeron al accidente del *Columbia* de la NASA en 2003?

6-11 Vidrios metálicos voluminosos y su comportamiento mecánico

6-76 En la figura 6-31 se muestra un diagrama de la carga en función del desplazamiento de un vidrio metálico. Un vidrio metálico es un metal no cristalino (amorfo). La muestra se probó en compresión. *Por lo tanto, aun cuando los valores de la carga y el desplazamiento se grafican como positivos, la longitud de la muestra se acortó durante la prueba*. La muestra tenía una longitud en la dirección de la carga de 6 mm y un área de la sección transversal de 4 mm^2. Los valores numéricos de la carga y el desplazamiento se dan en los puntos marcados con un círculo y una X. El primer punto de información es (0, 0). La falla de la muestra se indica con una X. Responda las siguientes preguntas.

a) Calcule el módulo elástico.

b) ¿Cómo se comparan el módulo elástico con el módulo de acero?

c) Calcule el esfuerzo ingenieril en el límite proporcional.

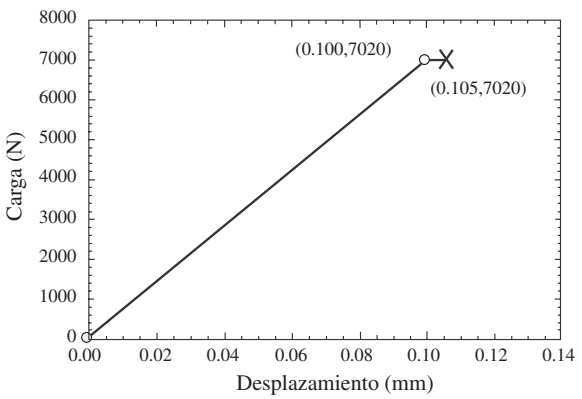


Figura 6-31 Carga en función del desplazamiento de un vidrio metálico probado en compresión del problema 6-76.

d) Considere su respuesta del inciso *c*) como la resistencia a la fluencia del material. ¿Es este un límite elástico alto o bajo? Soporte su respuesta con una orden de comparación de magnitud con un metal policristalino común.

e) Calcule la deformación verdadera en el límite proporcional. Recuerde que la longitud de la muestra disminuye en compresión.

f) Calcule la deformación verdadera total en la falla.

g) Calcule el trabajo de la fractura de este vidrio metálico con base en el esfuerzo y la deformación ingenieriles.

6-12 Comportamiento mecánico a escalas de longitud pequeñas

6-77 Mencione una aplicación específica para la que puede ser importante la comprensión del comportamiento mecánico dependiente del tamaño en el diseño del proceso.

6-13 Reología de los líquidos

6-78 Defina los términos "viscosidad", "viscosidad aparente" y "viscosidad cinemática".

6-79 ¿Cuáles son las dos ecuaciones que se utilizan para describir el comportamiento plástico Bingham?

6-80 ¿Qué es un material newtoniano? Proporcione un ejemplo.

6-81 ¿Qué significan los términos materiales "adelgazados por corte" y "engrosados por corte"?

6-82 Muchas pinturas y otras dispersiones no sólo son adelgazadas por corte, sino también tixotrópicas. ¿Qué significa el término "tixotrópico"?

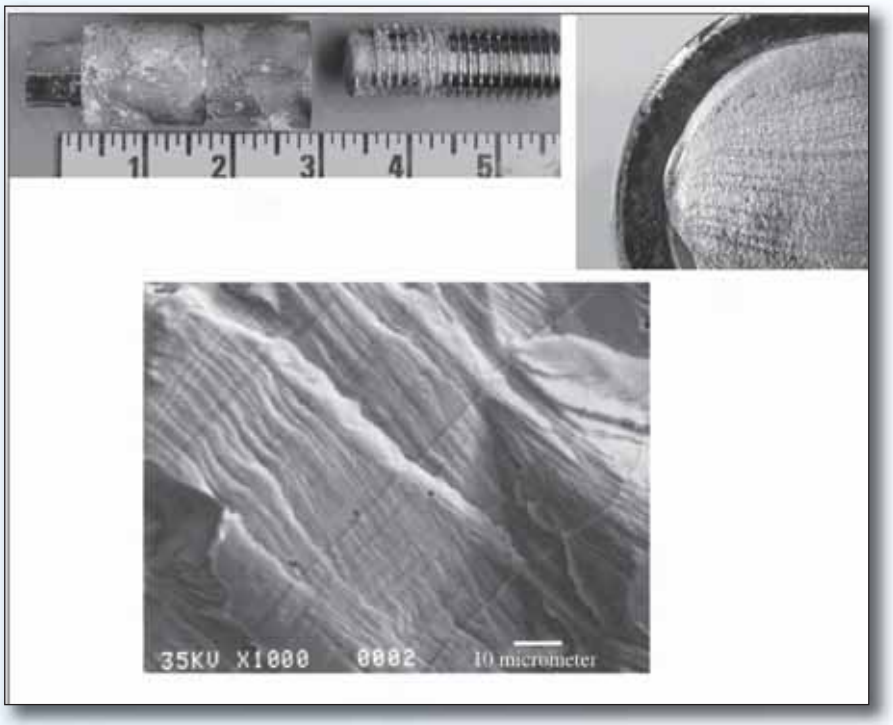
Problemas Knovel[MR]

K6-1 Una barra recocida de 3.048 m con un área de sección transversal de 555 mm^2 fue extruida de una aleación de aluminio 5083-O y se cargó axialmente. Bajo la carga, la longitud de la barra se incrementó a 3.0518 m. No ocurrió deformación plástica.

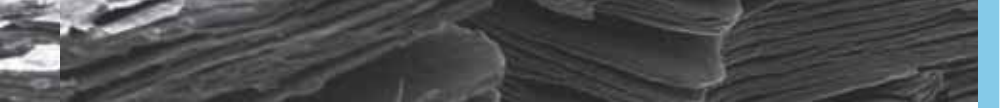
a) Encuentre el módulo de elasticidad del material y calcule su esfuerzo de tensión permisible, suponiendo que es de 50% del esfuerzo de fluencia a la tensión.

b) Calcule el esfuerzo de tensión y la carga axial aplicada a la barra.

c) Compare el esfuerzo de tensión calculado con el esfuerzo de tensión permisible y encuentre el valor absoluto de la elongación de la barra del esfuerzo permisible.



Las fallas de los pernos de acero inoxidable 316 que se muestran aquí se deben a la fatiga mecánica. En este caso, los pernos se rompen en el radio de la cabeza a la espiga (vea la figura *a*). Una fractografía óptica de una de las superficies de fractura (vea la figura *b*) muestra que la fractura inicia en una localización y se propaga a lo largo del perno hasta que se produce la falla final. Las marcas de playa y las estrías (vea la figura *c*), comunes de la fatiga, están presentes en todas las superficies de fractura. Con frecuencia, la falla por fatiga de sujetadores roscados es la más asociada con el ajuste insuficiente del sujetador, lo que genera la flexión y la fractura subsecuente. (*Imágenes cortesía de Corrosion Testing Laboratories, Bradley Krantz, Richard Corbett, Albert Olszewski y Robert R. Odle*)



CAPÍTULO

7

Propiedades mecánicas: segunda parte

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Por qué las fibras de vidrio de distintas longitudes tienen resistencias diferentes?*
- *¿Por qué un material o componente puede fracturarse con el paso del tiempo a pesar de que el esfuerzo total no supere la resistencia a la fluencia?*
- *¿Por qué los aviones tienen una vida útil finita?*
- *¿Por qué a la larga fallan los materiales?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Explicar, con base en argumentos energéticos, las razones por las que las imperfecciones en los materiales pueden causar fracturas prematuras.
- Definir y calcular la tenacidad a la fractura y el tamaño crítico de las imperfecciones de un material.
- Definir la relación de la mecánica de la fractura con las propiedades de los materiales, el esfuerzo aplicado y el tamaño de las imperfecciones.
- Identificar la morfología de las superficies de falla que indican si ha ocurrido una fractura por fragilidad o ductilidad.
- Describir el proceso de fatiga.
- Explicar las causas de la fatiga y medir el comportamiento de fatiga.
- Describir el proceso de termofluencia.

Un objetivo de este capítulo es introducir los conceptos básicos asociados con la tenacidad de los materiales a la fractura. En este sentido se examinarán los factores que afectan la resistencia de los vidrios y cerámicas y cómo la distribución de Weibull describe de forma cuantitativa la variabilidad de sus resistencias. Otro objetivo es aprender acerca de los fenómenos dependientes del tiempo, como la fatiga, la termofluencia y la corrosión bajo esfuerzo. En este capítulo se revisan algunos de los procedimientos básicos de prueba que utilizan los ingenieros para evaluar muchas de estas propiedades y las fallas de los materiales.

7-1 Mecánica de la fractura

La **mecánica de la fractura** es la disciplina que explica el comportamiento de los materiales que contienen grietas u otras imperfecciones menores. El término "imperfección" señala ciertas características como poros (orificios) pequeños, inclusiones o microgrietas. Por su parte, el vocablo "imperfección" *no* se refiere a defectos a nivel atómico, como las vacancias o dislocaciones. Lo que se desea conocer es el esfuerzo máximo que puede soportar un material si contiene imperfecciones de cierto tamaño y geometría. La **tenacidad a la fractura** mide la capacidad de un material que contiene una imperfección para soportar una carga aplicada. Observe que ésta *no* requiere una alta rapidez de deformación (impacto).

Puede llevarse a cabo una prueba común de tenacidad a la fractura mediante la aplicación de un esfuerzo de tensión a un espécimen preparado con una imperfección de tamaño y geometría conocidos (figura 7-1). El esfuerzo que se aplica al material se intensifica en la imperfección, la cual actúa como un *elevador de esfuerzo*. En un caso sencillo, el *factor de intensidad del esfuerzo* K es

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a} \tag{7-1}$$

donde f es el factor geométrico del espécimen y la imperfección, σ es el esfuerzo aplicado y a es el tamaño de la imperfección, como se define en la figura 7-1. En el caso de una muesca de borde sencillo [figura 7-1*a*)], $f = 1.12$. Si se supone que el espécimen tiene un ancho "infinito", $f \cong 1.0$.

Cuando se lleva a cabo una prueba sobre un espécimen con un tamaño de imperfección conocido, se puede determinar el valor de K que provoca que crezca la fisura y se produzca la falla. Este factor de intensidad del esfuerzo crítico se define como la *tenacidad a la fractura*, K_c:

$$K_c = K \text{ que se requiere para que una grieta se propague} \tag{7-2}$$

La tenacidad a la fractura depende del grosor de la muestra: a medida que aumenta el grosor, la tenacidad a la fractura K_c disminuye a un valor constante (figura 7-2). A esta constante se le llama *tenacidad a la fractura en estado de deformación plana*, K_{Ic}. Es esta K_{Ic} la que por lo general se reporta como la propiedad de un material. El valor de K_{Ic} no depende del grosor de la muestra. La tabla 7-1 compara el valor de K_{Ic} con la resistencia a la fluencia de varios materiales. Las unidades para medir la tenacidad a la fractura son ksi $\sqrt{\text{pulg}} = 1.0989$ MPa$\sqrt{\text{m}}$.

La capacidad de un material para resistir el crecimiento de una grieta depende de numerosos factores:

1. Las imperfecciones más grandes reducen el esfuerzo permitido. Las técnicas especiales de fabricación, como el filtrado de impurezas de metales líquidos y el prensado en caliente o prensado isostático en caliente de partículas en polvo para producir componentes cerámicos o superaleaciones, reducen el tamaño de las imperfecciones y mejoran la tenacidad a la fractura.

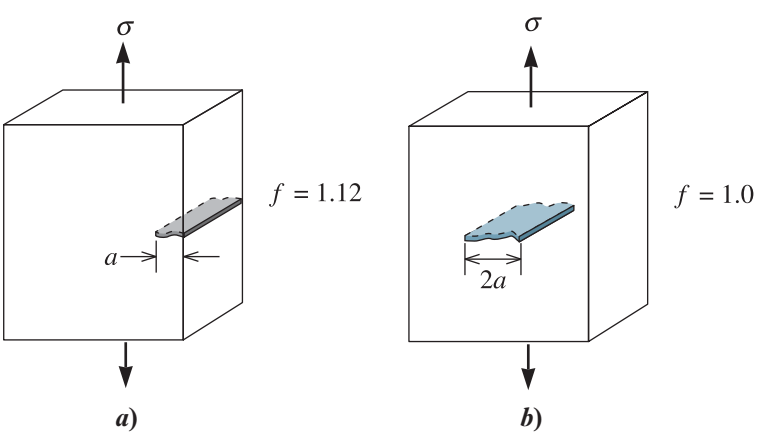


Figura 7-1 Representación esquemática de la tenacidad a la fractura de especímenes con imperfecciones *a*) en el borde y *b*) internas. El tamaño de la imperfección se define de forma diferente para las dos clases.

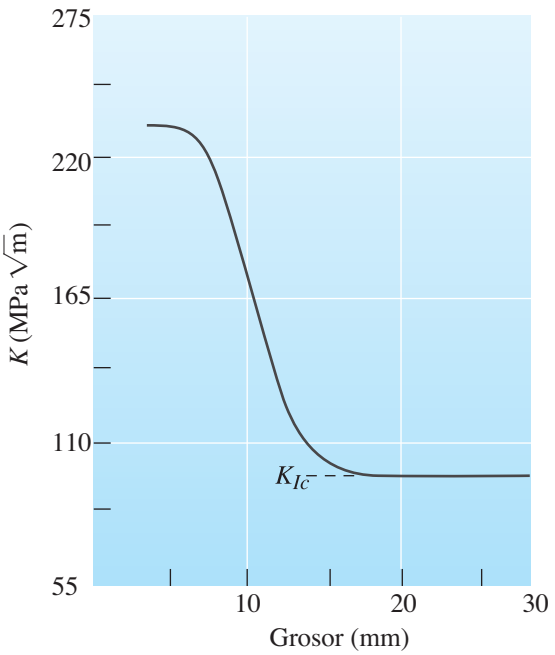


Figura 7-2 La tenacidad a la fractura K_c de un acero con una resistencia a la fluencia de 2,273 MPa disminuye a medida que aumenta de grosor, y con el tiempo se estabiliza en el estado de deformación plana K_{Ic}.

Tabla 7-1 Tenacidad a la fractura en estado de deformación plana K_{Ic}, de algunos materiales

Material	Tenacidad a la fractura K_{Ic} (MPa $\sqrt{m}$)	Resistencia a la fluencia o resistencia última (de sólidos *quebradizos*)(MPa)
Aleación de Al-Cu	24.18 36.26	455 324
Ti - 6% Al - 4% V	54.95 98.9	896 862
Acero al Ni-Cr	50.33 87.91	1641 1420
Al_2O_3	1.758	207
Si_3N_4	4.945	552
ZrO_2 fortalecida por transformación	10.99	414
Compuesto de Si_3N_4-SiC	56.04	827
Polímero de metacrilato de polimetilo	0.989	27.6
Polímero de policarbonato	3.297	57.9

2. La capacidad de un material para deformarse es crucial. En el caso de los metales dúctiles, el material cercano a la punta de la imperfección puede deformarse, lo que provoca que la punta de cualquier grieta se redondee, se reduzca el factor de intensidad del esfuerzo y se evite el crecimiento de la grieta. Por lo general, el incremento de la resistencia de un metal reduce la ductilidad y otorga tenacidad a la fractura menor. (Vea la tabla 7-1.) Los materiales *quebradizos* (como las cerámicas y muchos polímeros) tienen tenacidades a la fractura mucho menores que los metales.
3. Las piezas más rígidas y gruesas de un material tienen una menor tenacidad a la fractura que los materiales delgados.
4. El incremento de la velocidad de la aplicación de la carga, como en una prueba de impacto, por lo general reduce la tenacidad a la fractura del material.
5. Por lo general, el incremento de temperatura incrementa la tenacidad a la fractura, como en la prueba de impacto.

6. Por lo general, un tamaño pequeño de grano mejora la tenacidad a la fractura, mientras que más defectos puntuales y dislocaciones la reducen. Por lo tanto, un material cerámico de grano fino puede ofrecer una mejor resistencia al crecimiento de las grietas.
7. Se pueden aprovechar las transformaciones inducidas por el esfuerzo en ciertos materiales cerámicos que conducen a esfuerzos de compresión que provocan un incremento de la tenacidad a la fractura.

La prueba de fractura de las cerámicas no puede llevarse a cabo con facilidad cuando la muesca es aguda, dado que su formación a menudo provoca que las muestras se rompan. Se puede aplicar la prueba de dureza para obtener una medida de la tenacidad a la fractura de muchas cerámicas. Cuando un material cerámico se indenta, los esfuerzos de tensión generan grietas secundarias que se forman en la indentación y la longitud de las grietas secundarias proporcionan una medida de la tenacidad del material cerámico. En algunos casos se emplea una indentación creada utilizando un probador de dureza como una grieta inicial para la prueba de flexión. En general, este método de medición directa de las grietas es más adecuado por comparación, en lugar de las mediciones absolutas de los valores de las tenacidades a la fractura. En la figura 7-3 se muestran la tenacidad a la fractura y la resistencia a la fractura de varios materiales de ingeniería.

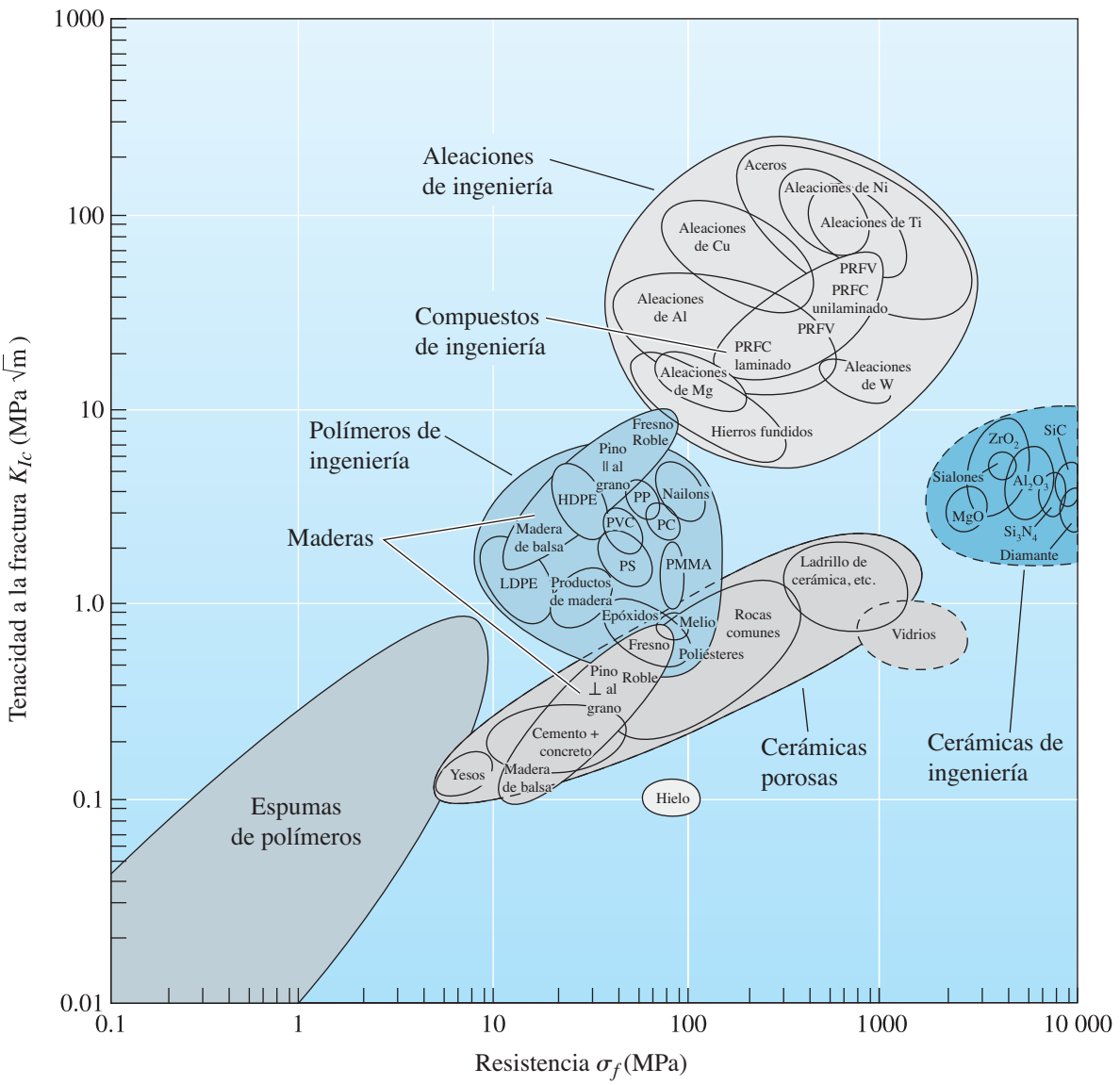


Figura 7-3 Tenacidad a la fractura en función de la resistencia de distintos materiales de ingeniería. (*Basada en* Mechanical Behavior of Materials, *de T. H. Courtney, 2a ed., Long Grove IL; Waveland Press, Inc., 2000*.)

7-2 Importancia de la mecánica de la fractura

El método de la mecánica de la fractura permite diseñar y seleccionar materiales mientras se toma en cuenta la presencia inevitable de imperfecciones. Existen tres variables que se deben considerar: la propiedad del material (K_c o K_{Ic}), el esfuerzo σ que el material debe soportar, y el tamaño de la imperfección a. Si se conocen dos de estas variables, se puede determinar la tercera.

Selección de un material Si se conoce el tamaño máximo a de las imperfecciones en el material y la magnitud del esfuerzo aplicado, se puede seleccionar un material con una tenacidad a la fractura K_c o K_{Ic} lo suficientemente grande para prevenir el crecimiento de las imperfecciones.

Diseño de un componente Si se conoce el tamaño máximo de cualquier imperfección y el material (por lo tanto, su K_c o K_{Ic} ya ha sido seleccionada), se puede calcular el esfuerzo máximo que el componente puede soportar. En consecuencia, se puede dimensionar de manera apropiada la parte para asegurar que no se exceda el esfuerzo máximo.

Diseño de un método de fabricación o de prueba Si el material ha sido seleccionado, se conoce el esfuerzo aplicado y se ha determinado el tamaño del componente, se puede calcular el tamaño máximo de una imperfección tolerable. Una técnica de prueba no destructiva que detecte cualquier imperfección mayor que este tamaño crítico puede ayudar a asegurar que la parte funcionará de manera segura. Además, se encuentra que, si se selecciona el proceso correcto de fabricación se pueden producir imperfecciones menores a este tamaño crítico.

Fractura frágil Cualquier grieta o imperfección limita la capacidad de una cerámica para soportar un esfuerzo de tensión. Esto se debe a que una grieta (en algunas ocasiones llamada **imperfección de Griffith**) concentra y magnifica el esfuerzo aplicado. En la figura 7-4 muestra una grieta de longitud a en la superficie de un material frágil. También se muestra el radio r de la grieta. Cuando se aplica un esfuerzo de tensión σ, el esfuerzo real en la punta de la grieta es

$$\sigma_{\text{real}} \cong 2\sigma\sqrt{a/r} \tag{7-3}$$

En el caso de grietas muy delgadas (r) o grietas largas (a), la razón $\sigma_{\text{real}}/\sigma$ se agranda o el esfuerzo se intensifica. Si el esfuerzo (σ_{real}) excede la resistencia a la fluencia, la grieta crece y con el tiempo provoca una falla, a pesar de que el esfuerzo aplicado nominal σ sea pequeño.

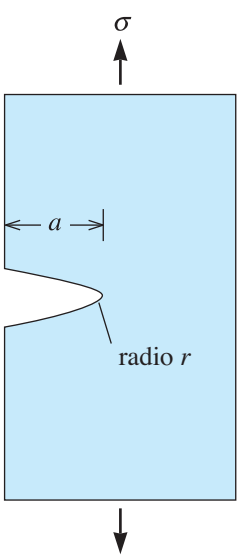


Figura 7-4 Diagrama de una imperfección de Griffith en una cerámica.

Ejemplo 7-1 *Diseño de una prueba no destructiva*

Una placa grande de acero que se usa en un reactor nuclear tiene una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de 87.91 MPa$\sqrt{\text{m}}$ y es expuesta a un esfuerzo de 310.3 MPa durante el servicio. Diseñe un procedimiento de prueba o inspección capaz de detectar una grieta en el borde de la placa antes de que sea probable que la grieta crezca a una velocidad catastrófica.

SOLUCIÓN

Es necesario determinar el tamaño mínimo de una grieta que se propagará en el acero en estas condiciones. A partir de la ecuación 7-1, suponiendo que $f = 1.12$ en una grieta de muesca de un borde:

$$K_{Ic} = f\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$87.91 \times 10^6 \text{ Pa}\sqrt{\text{m}} = (1.12)(310.3 \times 10^6 \text{ Pa})\sqrt{\pi a}$$

$$a = 20.3 \text{ mm}$$

Una grieta de 20.3 mm de profundidad en el borde sería relativamente fácil de detectar. Con frecuencia, las grietas de este tamaño pueden observarse a simple vista. Otras pruebas, como la inspección con un tinte penetrante, la inspección por partículas magnéticas y la inspección por corrientes parásitas, también detectan grietas mucho menores que esta. Si la rapidez de crecimiento de una grieta es lenta y la inspección se realiza con regularidad, debe descubrirse una grieta mucho antes de que alcance el tamaño crítico.

Otro método reconoce que un esfuerzo aplicado provoca una deformación elástica, relacionada con el módulo de elasticidad E del material. Cuando la grieta se propaga, esta energía de deformación se libera y reduce la energía total. Sin embargo, al mismo tiempo se crean dos nuevas superficies por la extensión de la grieta, lo cual incrementa la energía asociada con la superficie. Cuando se balancean la energía de deformación y la energía en la superficie, se descubre que el esfuerzo crítico que se requiere para propagar la grieta está dado por la ecuación de Griffito:

$$\sigma_{\text{crítico}} \cong \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \tag{7-4}$$

donde a es la longitud de una grieta en la superficie (o la mitad de la longitud de una grieta interna) y γ es la energía en la superficie por unidad de área. De nuevo, esta ecuación muestra que incluso las fisuras pequeñas limitan severamente la resistencia de la cerámica.

También observe que si se reacomoda la ecuación 7-1, la cual describe el factor de intensidad del esfuerzo K, se obtiene

$$\sigma = \frac{K}{f\sqrt{\pi a}} \tag{7-5}$$

Esta ecuación es formalmente similar a la ecuación 7-4. Ambas indican la dependencia de las propiedades mecánicas con el tamaño de las fisuras presentes en la cerámica. El desarrollo de procesos de fabricación (vea el capítulo 15) para minimizar el tamaño de las fisuras se convierte en un elemento crucial para mejorar la resistencia de las cerámicas.

Las fisuras son de importancia principal cuando esfuerzos de tensión actúan sobre el material. Los esfuerzos de compresión cierran en vez de abrir una grieta; en consecuencia, normalmente las cerámicas tienen muy buenas resistencias a la compresión.

Ejemplo 7-2 *Propiedades de las cerámicas de SiAlON*

Suponga que una cerámica avanzada sialon (acrónimo de SiAlON u oxinitruro de silicio y aluminio, por sus siglas en inglés) posee una resistencia a la tensión de 413.7 MPa. Suponga que este valor es el de una cerámica sin imperfecciones. (En la práctica, es casi imposible producir cerámicas que carezcan de ellas.) Se observa una grieta de 0.254 mm de profundidad antes de que se pruebe

una parte de sialon. La parte falla de manera inesperada a un esfuerzo de 3.48 MPa debido a la propagación de la grieta. Calcule el radio de la punta de la grieta.

SOLUCIÓN

La falla que ocurrió debido al esfuerzo aplicado de 3.48 MPa, magnificada por la concentración del esfuerzo en la punta de la grieta, produjo un esfuerzo real igual a la resistencia a la tensión última. A partir de la ecuación 7-3,

$$\sigma_{\text{real}} = 2\sigma\sqrt{a/r}$$

$$413.7 \times 10^6 \text{ Pa} = (2)(3.48 \times 10^6)\sqrt{0.254 \text{ mm}/r}$$

$$\sqrt{0.254/r} = 60 \qquad \text{o} \qquad 0.254/r = 3600$$

$$r = 7.1 \times 10^{-5} \text{ mm} = 710 \text{ Å}$$

La probabilidad de que se pueda medir un radio de curvatura de este tamaño por medio de cualquier método de prueba no destructiva es virtualmente de cero. Por lo tanto, aunque la ecuación 7-3 puede ayudar a ilustrar los factores que influyen en la forma en que se propaga una grieta en un material frágil, no ayuda a predecir la resistencia de las partes cerámicas reales.

Ejemplo 7-3 *Diseño de un soporte cerámico*

Determine el grosor mínimo permisible de una placa de sialon de 76.2 mm de ancho, material que posee una tenacidad a la fractura de 9.89 MPa$\sqrt{\text{m}}$. La placa deberá soportar una carga de tensión de 178 kN. La parte se probará de manera no destructiva para asegurar que no se presenten imperfecciones que podrían ocasionar la falla. El grosor mínimo permisible de la parte dependerá del tamaño mínimo de las imperfecciones que puedan determinarse por medio de la técnica disponible de prueba. Suponga que se puede recurrir a tres métodos de prueba no destructivos. La radiografía de rayos X puede detectar imperfecciones mayores de 0.508 mm, la radiografía de rayos gamma puede detectar imperfecciones mayores de 0.203 mm y la inspección ultrasónica puede detectar imperfecciones mayores de 0.127 mm. Suponga un factor geométrico $f = 1.0$ para todas las fisuras.

SOLUCIÓN

Para estos tamaños de imperfecciones, se debe calcular el grosor mínimo de la placa que asegurará que estos tamaños de las imperfecciones no se propagarán. A partir de la ecuación 7-5, con $f = 1.0$,

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} = \frac{F}{A_{\text{mín}}}$$

$$A_{\text{mín}} = \frac{F\sqrt{\pi a}}{K_{Ic}} = \frac{(178 \times 10^3 \text{ N})(\sqrt{\pi})(\sqrt{a})}{9.89 \times 10^6 \text{ Pa}\sqrt{\text{m}}}$$

$$A_{\text{mín}} = 3.19 \times 10^{-2}\sqrt{a}\text{ m}^2 \text{ y grosor} = [0.2 \text{ m}^2/(0.0762 \text{ m})]\sqrt{a} = 0.525\sqrt{a}$$

Método de prueba no destructiva	Grieta detectable más pequeña (mm)	Área mínima (mm^2)	Grosor mínimo (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)
Radiografía de rayos X	0.508	716	9.4	160
Radiografía de rayos γ	0.203	452	5.84	254
Inspección ultrasónica	0.127	361	4.83	320

La capacidad para detectar las imperfecciones, junto con la capacidad para producir una cerámica con imperfecciones menores al límite de detección, afecta de forma significativa el esfuerzo máximo que puede tolerarse y, por lo tanto, el tamaño de la parte. En este ejemplo, la parte puede ser más pequeña si se cuenta con los medios para someterla a una inspección ultrasónica.

La tenacidad a la fractura también es importante. Si se hubiese utilizado Si_3N_4, con una tenacidad a la fractura de 3.3 MPa$\sqrt{m}$ en vez del sialon, se podrían repetir los cálculos y demostrar que, para la prueba ultrasónica, el grosor mínimo es de 14.2 mm y el esfuerzo máximo es de sólo 165.5 MPa.

7-3 Características microestructurales de una fractura en materiales metálicos

Fractura dúctil

Por lo general, la fractura dúctil ocurre de forma **transgranular** (a través de los granos) en los metales que tienen buena ductilidad y tenacidad. Con frecuencia se observa una cantidad considerable de deformación —que incluye rebajo (estricción)— en el componente fallido. La deformación ocurre antes de la fractura final. Por lo general, las fracturas dúctiles son provocadas por sobrecargas sencillas o por la aplicación de un esfuerzo muy grande al material.

En una prueba de tensión simple, la fractura dúctil comienza con la formación de núcleos, crecimiento y coalescencia de los microhuecos en el centro de la barra de prueba (figura 7-5). Los **microhuecos** se forman cuando un gran esfuerzo provoca la separación del metal en los límites de los granos o interfaces entre el metal y las partículas impuras pequeñas (inclusiones). A medida que aumenta el esfuerzo local, los microhuecos crecen y se fusionan en cavidades más grandes. Con el tiempo, el área de contacto de metal con metal es demasiado pequeña para soportar la carga y se produce la fractura.

La deformación por deslizamiento también contribuye a la fractura dúctil de un metal. Se sabe que el deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante resuelto alcanza el esfuerzo cortante resuelto crítico y que los esfuerzos cortantes resueltos son mayores a un ángulo de 45° con respecto al esfuerzo de tensión aplicado (capítulo 4, ley de Schmid).

Estos dos aspectos de la fractura dúctil proporcionan las características distintivas de la superficie fallida. En las secciones metálicas gruesas se puede encontrar evidencia de rebajo, una porción significativa de la superficie de la fractura con una cara plana cuando los microhuecos primero se nuclean y coalescen, y un borde cortante pequeño donde la superficie de la fractura está en un ángulo de 45° con respecto al esfuerzo aplicado. El borde cortante, que indica que ocurrió un deslizamiento, proporciona a la fractura una apariencia de copa y cono (figuras 6-7 y 7-6). Una observación microscópica sencilla de esta fractura puede ser suficiente para identificar el modo de la fractura dúctil.

El examen de la superficie de la fractura a una magnificación alta —quizás mediante un microscopio electrónico de barrido— revela una superficie con hoyuelos (figura 7-7). Los hoyuelos son indicios de los microhuecos producidos durante la fractura. Por lo general, estos microhuecos

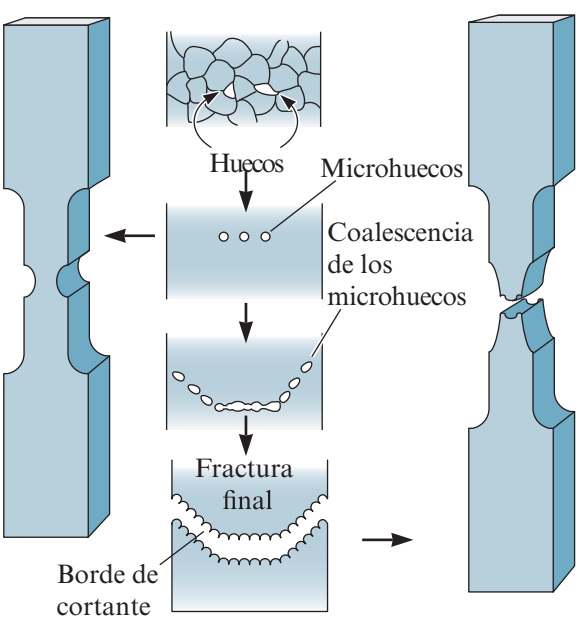


Figura 7-5 Cuando se jala un material dúctil en una prueba de tensión, comienza el rebajo y se forman huecos —comenzando cerca del centro de la barra— debido a la nucleación (formación de núcleos) en los límites de los granos o por inclusiones. A medida que la deformación continúa, puede formarse un borde cortante a 45°, lo que produce una fractura final de capa y cono.

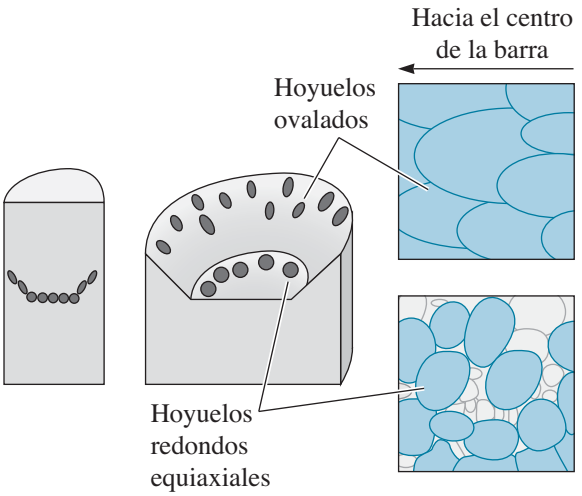
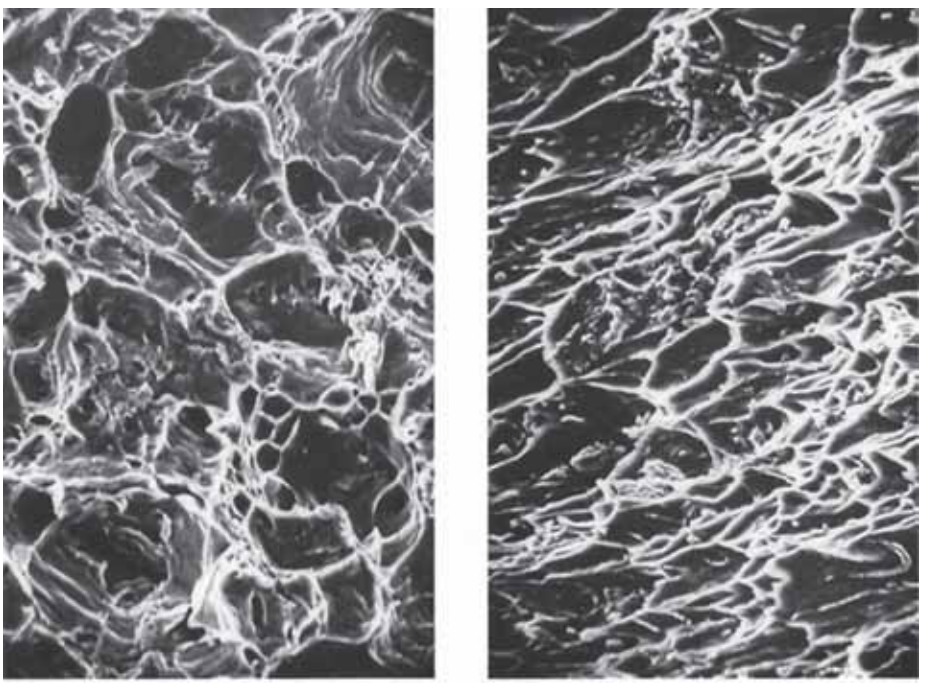


Figura 7-6 Durante la fractura dúctil se forman hoyuelos equiaxiales en el centro, donde crecen los microhuecos. Los hoyuelos alargados, que apuntan hacia el origen de la fractura, se forman en el borde cortante.



a) ***b)***

Figura 7-7 Micrografías electrónicas de barrido de un acero 1018 recocido que tiene una fractura dúctil en una prueba de tensión. *a*) Los hoyuelos equiaxiales en el centro plano de la copa y el cono y *b*) los hoyuelos alargados en el borde cortante (1250 ×). (*Reimpresión de las imágenes por cortesía de Don Askeland*)

son redondos, o equiaxiales, cuando un esfuerzo de tensión normal produce la falla [figura 7-7*a*)]; sin embargo, en el borde cortante, los hoyuelos tienen forma ovalada, o alargada, con los óvalos apuntando hacia el origen de la fractura [figura 7-7*b*)].

En una placa delgada se observa menos estricción y toda la superficie de la fractura puede estar en una cara de corte. El examen microscópico de la superficie de la fractura muestra hoyuelos alargados en lugar de equiaxiales, lo que indica una proporción de deslizamiento 45° mayor que en los metales más gruesos.

Fractura frágil

La fractura frágil ocurre en metales y aleaciones de alta resistencia o con ductilidad y tenacidad malas. Además, incluso los metales que por lo general son dúctiles pueden fallar de manera frágil a temperaturas bajas, en las secciones gruesas, a velocidades de deformación

Ejemplo 7-4 *Análisis de la falla de una cadena de levantamiento*

Una cadena que se usa para levantar cargas pesadas falla. El examen del eslabón fallido indica una deformación y estricción considerables antes de la falla. Mencione algunas de las posibles razones de la falla.

SOLUCIÓN

Esta descripción sugiere que la cadena falló de una manera dúctil por una sobrecarga de tensión simple. Dos factores podrían ser los responsables de esta falla:

1. La carga excedió la capacidad de levantamiento de la cadena. Por lo tanto, el esfuerzo debido a la carga excedió la resistencia a la tensión última de la cadena, lo que permitió la falla. La comparación de la carga con las especificaciones del fabricante indicará que la cadena no estaba proyectada para una carga tan pesada. ¡Esto es culpa del usuario!
2. La composición del material de la cadena no era la adecuada o se trató térmicamente de forma inapropiada. En consecuencia, la resistencia a la fluencia era menor que la que pretendía el fabricante y podría no soportar la carga. ¡Esto puede ser culpa del fabricante!

altas (como el impacto), o cuando las imperfecciones desempeñan una función importante. Con frecuencia, las fracturas frágiles se observan cuando el impacto, en lugar de la sobrecarga, provoca la falla.

Para que se produzca una fractura frágil, se requiere poca o ninguna deformación plástica. Por lo general, la iniciación de la grieta ocurre en las imperfecciones pequeñas, lo cual provoca una concentración del esfuerzo. La grieta puede moverse a una velocidad aproximada a la del sonido en el metal. Por lo general, la grieta se propaga con mayor facilidad a lo largo de planos cristalográficos específicos, con frecuencia los planos {100}, por desdoblamiento. Sin embargo, en algunos casos la grieta puede tomar una trayectoria **intergranular** (a lo largo de los límites de los granos), en particular cuando la segregación (separación preferencial de distintos elementos) o las inclusiones debilitan los límites de los granos.

La fractura frágil puede identificarse observando las características en la superficie fallida. Por lo general, ésta es plana y perpendicular al esfuerzo aplicado en una prueba de tensión. Si la falla ocurre por desdoblamiento de moléculas, cada grano fracturado es plano y está orientado de manera diferente, lo que le proporciona una apariencia cristalina o de "caramelo macizo" a la superficie de la fractura (figura 7-8). Con frecuencia, las personas sin formación profesional aseguran que el metal falló porque se cristalizó. Por supuesto, para comenzar, se sabe que el material metálico era cristalino y que la apariencia de la superficie se debe a los planos de clivaje.

Otra característica común de la fractura es el **patrón en forma de V (Chevron)** (figura 7-9), que producen los frentes de la grieta separados que se propagan en distintos niveles del material. Se forma un patrón radiante de marcas o bordes superficiales que irradian del origen de la grieta (figura 7-10). El patrón en forma de V es visible a simple vista o con una lupa y ayuda a identificar la naturaleza frágil del proceso de la falla al igual que el origen de la misma.

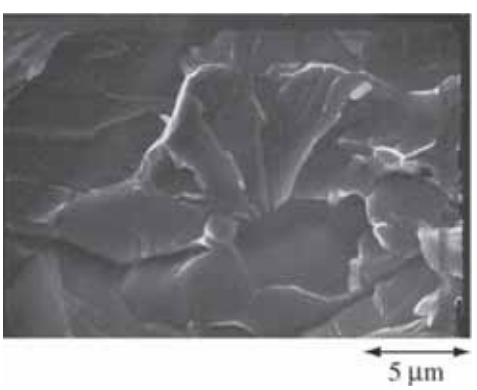


Figura 7-8 Micrografía electrónica de barrido de la superficie de una fractura frágil de un acero templado 1010. (*Cortesía de C. W. Ramsay*)

Figura 7-9 Patrón en forma de V en un acero templado 4340 de 0.5 pulg. de diámetro. El acero falló de una manera frágil por un golpe de impacto. (*Reimpresión cortesía de Don Askeland*)

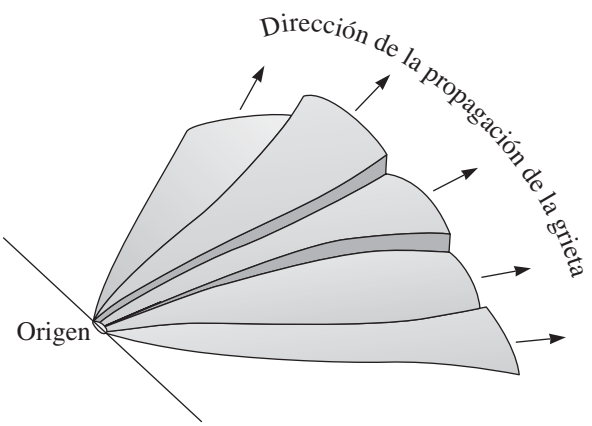


Figura 7-10 El patrón en forma de V se forma a medida que la grieta se propaga del origen a distintos niveles. El patrón apunta de vuelta al origen.

Ejemplo 7-5 ***Análisis de la falla del eje de un automóvil***

Un ingeniero que investiga la causa de un accidente de automóvil descubre que el aro del neumático trasero derecho se rompió en el eje, y este está doblado. La superficie de la fractura revela un patrón en forma de V que apunta hacia la superficie del eje. Sugiera una causa posible de la fractura.

SOLUCIÓN

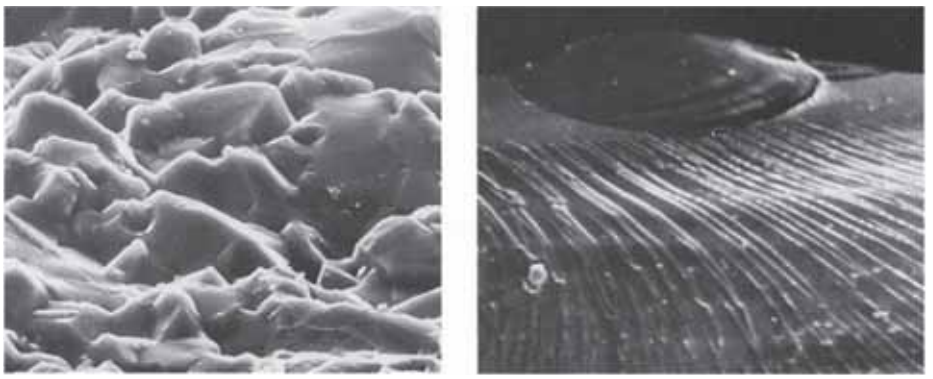
La evidencia sugiere que el eje no se rompió antes del accidente. El eje deformado significa que el neumático aún estaba montado cuando se aplicó la carga. El patrón en forma de V indica que el aro sufrió un impacto intenso, que luego se transmitió al eje. La evidencia preliminar sugiere que el conductor perdió el control y se estrelló, y la fuerza del choque provocó que el eje se rompiera. El examen posterior de la superficie, la microestructura, la composición y las propiedades de la fractura pueden verificar que el eje se fabricó de manera apropiada.

7-4 Características microestructurales de las fracturas en cerámicas, vidrios y compuestos

En los materiales cerámicos, los enlaces iónicos o covalentes permiten poco o ningún deslizamiento. En consecuencia, la falla es resultado de una fractura frágil. La mayoría de las cerámicas frágiles fallan debido a una ruptura a lo largo de planos compactos espaciados de manera amplia. Por lo general, la superficie de la fractura es lisa y con frecuencia sin características superficiales distintivas que apunten al origen de la fractura [figura 7-11*a*)].

Los vidrios también se fracturan de manera frágil. Con frecuencia se observa una superficie de **fractura concoidal,** que contiene una zona especular lisa cerca del origen de la fractura, con líneas de rasgado que abarcan el resto de la superficie [figura 7-11*b*)].

De nuevo, las líneas de rasgado apuntan a la zona especular y al origen de la grieta, de modo muy similar al patrón en forma de V en los metales.



a) *b*)

Figura 7-11 Micrografías electrónicas de barrido de las superficies de fracturas en cerámicas. *a*) Superficie de la fractura del Al_2O_3, que muestra los planos de clivaje (1250 ×) y *b*) superficie de la fractura del vidrio, que muestra la zona especular (superior) y las líneas de rasgado características de una fractura concoidal (300 ×). (*Reimpresión cortesía de Don Askeland.*)

Los polímeros pueden fallar por medio de un mecanismo dúctil o por medio de uno frágil. Debajo de la temperatura de transición vítrea (T_v), los polímeros termoplásticos fallan de manera frágil, es decir, de modo muy parecido a la vítrea. Asimismo, los polímeros termoestables duros, que tienen una estructura enlazada de manera cruzada tridimensional (vea el capítulo 16) fallan por medio de un mecanismo frágil. Algunos plásticos con estructuras que consisten en cadenas enredadas, pero no enlazadas de manera cruzada químicamente, fallan en forma dúctil por encima de la temperatura de transición vítrea, lo que aporta evidencia de la deformación extensiva e incluso de estricción antes de la falla. El comportamiento dúctil es el resultado del deslizamiento de las cadenas de polímero, lo cual no es posible en los polímeros termoestables.

La fractura en los materiales compuestos reforzados con fibras es más compleja. Por lo general, estos compuestos contienen fibras frágiles resistentes rodeadas por una matriz dúctil blanda, como es el caso del aluminio reforzado con boro. Cuando se aplica un esfuerzo de tensión a lo largo de las fibras, el aluminio blando se deforma de manera dúctil, con la formación y coalescencia de huecos que con el tiempo producen una superficie de fractura con hoyuelos. A medida que el aluminio se deforma, la carga ya no es transmitida de manera eficaz entre las fibras y la matriz; las fibras se rompen de manera frágil hasta que quedan tan pocas de ellas intactas que no pueden soportar la carga final.

La fractura es más común si el enlazamiento entre las fibras y la matriz es deficiente. En este caso pueden formarse huecos entre las fibras y la matriz, y provocar disgregación. También pueden formarse huecos entre las capas de la matriz si las cintas u hojas del compuesto no están enlazadas de manera apropiada, lo que provoca **deslaminación** (figura 7-12). La deslaminación, en este contexto, se refiere al proceso que provoca que las capas de distintos materiales de un compuesto comiencen a separarse.

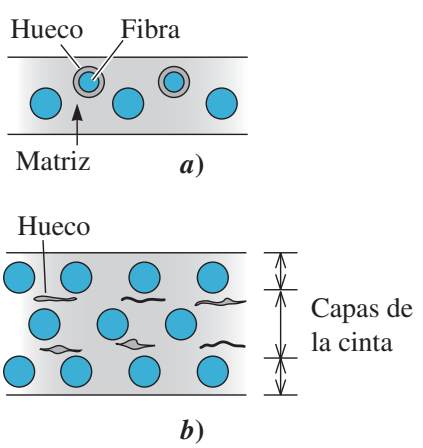


Figura 7-12 Los compuestos reforzados con fibras pueden fallar por medio de varios mecanismos. *a*) Debido al enlazamiento débil entre la matriz y las fibras pueden formarse huecos, los cuales provocan que las fibras se separen. *b*) Si las capas individuales de la matriz están enlazadas de manera deficiente, la matriz puede delaminarse y crear huecos.

Ejemplo 7-6 ***Fracturas en los compuestos***

Describa la diferencia entre el mecanismo de fractura de un compuesto de aluminio reforzado con boro y un compuesto epoxi reforzado con fibras de vidrio.

SOLUCIÓN

En el compuesto de boro-aluminio, la matriz de aluminio es blanda y dúctil; por lo tanto, se espera que falle de manera dúctil. Por el contrario, las fibras de boro fallan de modo frágil. Las fibras de vidrio y el epoxi son frágiles; por ello, el compuesto como un todo debe mostrar poca evidencia de fractura dúctil.

7-5 Estadística de Weibull para analizar la resistencia a la falla

Cuando se evalúa la resistencia de los materiales cerámicos se debe contar con un método estadístico. La resistencia de las cerámicas y los vidrios depende del tamaño y la distribución de los tamaños de las imperfecciones. En estos materiales se originan imperfecciones durante el procesamiento a medida que se fabrica la cerámica. Las imperfecciones pueden formarse durante el maquinado, molido, etc. Los vidrios también pueden desarrollar microgrietas como resultado de la interacción con el vapor de agua en el aire. Si se prueba la alúmina u otros componentes cerámicos de distintos tamaños y geometrías, con frecuencia se encuentra una gran dispersión en los valores medidos, incluso si su composición nominal es la misma. De modo similar, si se prueba la resistencia de las fibras de vidrio de una composición determinada, se encuentra que, en promedio, las fibras cortas son más resistentes que las largas. La resistencia de las cerámicas y los vidrios depende de la probabilidad de encontrar una imperfección que exceda un cierto tamaño crítico. Esta probabilidad aumenta a medida que se incrementa el tamaño del componente o la longitud de las fibras. Como resultado, es probable que la resistencia de los componentes o fibras más grandes sea menor que la de los componentes más pequeños o fibras más cortas. En los materiales metálicos o poliméricos, los cuales pueden exhibir deformaciones plásticas relativamente grandes, el efecto de la distribución de las imperfecciones y del tamaño de las imperfecciones no se siente igual que en las cerámicas y vidrios. En estos materiales, la iniciación de las grietas a partir de las imperfecciones es entorpecida por la deformación plástica. Por lo tanto, en el caso de los materiales dúctiles, la distribución de la resistencia es estrecha y cercana a una distribución gaussiana. Sin embargo, la resistencia de las cerámicas y los vidrios varía de forma considerable (es decir, si se prueba un gran número de muestras idénticas de vidrio de sílice o de la cerámica alúmina, los resultados mostrarán una dispersión amplia debido a los cambios en la distribución de los tamaños de las fisuras). La resistencia de los materiales frágiles, como las cerámicas y los vidrios, no es gaussiana; está dada por la **distribución de Weibull,** que no es otra cosa que un indicador de la variabilidad de la resistencia de los materiales que resulta de una distribución de los tamaños de las imperfecciones. Este comportamiento se genera a partir de las imperfecciones de tamaño crítico en los materiales con una distribución de los tamaños de las imperfecciones (es decir, la falla se debe al eslabón más débil de una cadena).

La distribución de Weibull que se muestra en la figura 7-13 describe la fracción de las muestras que fallan ante la magnitud de los distintos esfuerzos aplicados. A esfuerzos bajos, una pequeña fracción de las muestras contiene imperfecciones lo suficientemente grandes para provocar una frac-

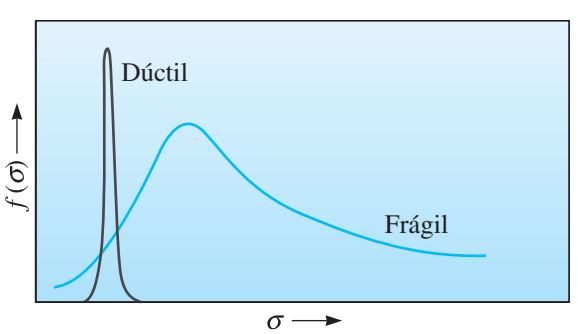


Figura 7-13 La distribución de Weibull describe la fracción de las muestras que fallan ante cualquier esfuerzo aplicado.

tura; la mayoría falla ante un esfuerzo aplicado intermedio y sólo unas cuantas contienen imperfecciones pequeñas y no fallan hasta que se aplican esfuerzos grandes. Para poder predecir, se prefiere una distribución muy estrecha.

Considere un cuerpo de volumen V con una distribución de las imperfecciones y sujeto a un esfuerzo σ. Si se supone que el volumen, V, consistía en n elementos con volumen V_0 y cada elemento tenía la misma distribución de los tamaños de las imperfecciones, puede demostrarse que la probabilidad de supervivencia, $P(V_0)$ (es decir, la probabilidad de que un material frágil no se fracturará bajo el esfuerzo aplicado), está dada por

$$P(V_0) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma - \sigma_{\text{mín}}}{\sigma_0}\right)^m\right] \tag{7-6}$$

La probabilidad de falla, $F(V_0)$, puede escribirse como

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma - \sigma_{\text{mín}}}{\sigma_0}\right)^m\right] \tag{7-7}$$

En las ecuaciones 7-6 y 7-7, σ es el esfuerzo aplicado, σ_0 es el parámetro escalable dependiente del tamaño y la forma del espécimen, y $\sigma_{\text{mín}}$ es el nivel de esfuerzo debajo del cual la probabilidad de falla es cero (es decir, la probabilidad de supervivencia es de 1.0). En estas ecuaciones, m es el **módulo de Weibull**. En teoría, los valores del módulo de Weibull pueden ir de 0 a ∞. El módulo de Weibull es una medida de la variabilidad de la resistencia del material.

El módulo de Weibull, *m,* indica la variabilidad de la resistencia. En el caso de los metales y aleaciones, el módulo de Weibull es de ~100. En el de las cerámicas tradicionales (por ejemplo, ladrillos, alfarería, etc.), el módulo de Weibull es menor de 3. Las cerámicas de ingeniería, cuyo procesamiento está mejor controlado y por ello se espera que el número de imperfecciones sea menor, tienen un módulo de Weibull de 5 a 10.

Observe que en el caso de las cerámicas y otros sólidos frágiles se puede suponer que $\sigma_{\text{mín}} = 0$. Esto se debe a que no existe un nivel de esfuerzo distinto de cero del que se pueda aseverar que un material frágil no fallará. En el caso de los *materiales frágiles* las ecuaciones 7-6 y 7-7 pueden rescribirse como a continuación:

$$P(V_0) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \tag{7-8}$$

y

$$F(V_0) = 1 - P(V_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \tag{7-9}$$

Con base en la ecuación 7-8, ante un esfuerzo aplicado σ de cero, la probabilidad de supervivencia es 1. A medida que aumenta el esfuerzo aplicado σ, $P(V_0)$ disminuye, aproximándose a cero a valores muy altos de los esfuerzos aplicados. También se puede describir otro significado del parámetro σ_0. En la ecuación 7-8, cuando $\sigma = \sigma_0$, la probabilidad de supervivencia se convierte en $1/e \cong 0.37$. Por lo tanto, σ_0 es el nivel de esfuerzo al cual la probabilidad de supervivencia es de ≅ 0.37 o 37%. También se puede enunciar que σ_0 es el nivel de esfuerzo al cual la probabilidad de falla es de ≅ 0.63 o 63%.

Las ecuaciones 7-8 y 7-9 pueden modificarse para tomar en cuenta muestras con distintos volúmenes. Puede demostrarse que, en el caso de una probabilidad igual de supervivencia, las muestras con volúmenes más grandes tendrán resistencias menores. Este resultado se mencionó antes (por ejemplo, las fibras de vidrio más largas serán más débiles que las fibras de vidrio más cortas).

Los siguientes ejemplos ilustran cómo pueden utilizarse las gráficas de Weibull para analizar las propiedades mecánicas de los materiales y diseñar componentes.

Ejemplo 7-7 *Resistencia de las cerámicas y probabilidad de falla*

Una cerámica de ingeniería avanzada tiene un módulo de Weibull $m = 9$. La resistencia a la flexión es de 250 MPa con una probabilidad de falla $F = 0.4$. ¿Cuál es el nivel de resistencia a la flexión si la probabilidad de falla tiene que ser de 0.1?

SOLUCIÓN

Se supone que todas las muestras probadas tenían el mismo volumen, por lo que el tamaño de la muestra no será un factor de importancia en este caso. Se puede utilizar el símbolo V para denotar el volumen de la muestra en lugar de V_0. Se está tratando con un material frágil, por lo que se inicia con la ecuación 7-9:

$$F(V) = 1 - P(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

o

$$1 - F(V) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

Aplique el logaritmo de ambos lados,

$$\ln[1 - F(V)] = -\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m$$

Obtenga de nuevo los logaritmos de ambos lados,

$$\ln\{-\ln[1 - F(V)]\} = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \tag{7-10}$$

Se puede eliminar el signo negativo del lado izquierdo de la ecuación 7-10 reescribiendo la ecuación como

$$\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{1 - F(V)}\right]\right\} = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0) \tag{7-11}$$

Con $F = 0.4$, $\sigma = 250$ MPa y $m = 9$ en la ecuación 7-11, se tiene

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - 0.4}\right)\right] = 9(\ln 250 - \ln \sigma_0) \tag{7-12}$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned}\ln[\ln (1/0.6)] &= -0.67173\\ &= 9(5.52146 - \ln \sigma_0)\end{aligned}$$

Por lo tanto, cuando $\ln\sigma_0 = 5.52146 + 0.07464 = 5.5961$. Esto da un valor de $\sigma_0 = 269.4$ MPa. Esta es la resistencia característica de la cerámica. En el caso de un nivel de esfuerzo de 269.4 MPa, la probabilidad de supervivencia es de 0.37 (o la probabilidad de falla es de 0.63).

Ahora queremos determinar el valor de σ para $F = 0.1$. A medida que disminuye la probabilidad de falla (F), el nivel de esfuerzo al cual puede someterse la cerámica (σ) también disminuye. Se sabe que $m = 9$ y $\sigma_0 = 269.4$ MPa. Se sustituyen estos valores en la ecuación 7-11:

$$\begin{aligned}\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - 0.1}\right)\right] &= 9(\ln \sigma - \ln 269.4)\\ -2.25037 &= 9(\ln \sigma - 5.5961)\\ \therefore -0.25004 &= \ln \sigma - 5.5961\\ \ln \sigma &= 5.3461\end{aligned}$$

o $\sigma = 209.8$ MPa. Como se esperaba, a medida que la probabilidad de falla disminuye a 0.1, también disminuye el nivel del esfuerzo que puede soportar el material.

Ejemplo 7-8 *Determinación del parámetro del módulo de Weibull*

Se probaron siete especímenes de carburo de silicio y se obtuvieron las siguientes resistencias a la fractura: 23, 49, 34, 30, 55, 43 y 40 MPa. Calcule el módulo de Weibull con base en esos datos y ajuste la información a la ecuación 7-11. Explique la confiabilidad de la cerámica.

SOLUCIÓN

Primero, observe que en cualquier tipo de análisis estadístico se necesita un gran número de muestras. Siete muestras no son suficientes. El propósito de este ejemplo es ilustrar el cálculo.

Un método sencillo, aunque no completamente exacto, para determinar el comportamiento de la cerámica es asignar un valor numérico (1 a 7) a los especímenes, asignándole el 1 al espécimen que tiene la menor resistencia a la fractura. El número total de especímenes es n (en este caso, 7). En consecuencia, la probabilidad de falla F es el valor numérico dividido entre $n + 1$ (en este caso, 8). Se puede graficar entonces $\ln\{\ln 1/[1 - F(V_0)]\}$ en función del $\ln \sigma$. La siguiente tabla y la figura 7-14 muestran los resultados de estos cálculos. Observe que σ se graficó en una escala logarítmica.

Espécimen *i*-ésimo	σ(MPa)	$F(V_0)$	$\ln\{\ln 1/[1 - F(V_0)]\}$
1	23	1/8 = 0.125	−2.013
2	30	2/8 = 0.250	−1.246
3	34	3/8 = 0.375	−0.755
4	40	4/8 = 0.500	−0.367
5	43	5/8 = 0.625	−0.019
6	49	6/8 = 0.750	+0.327
7	55	7/8 = 0.875	+0.732

La pendiente de la línea ajustada, o el módulo de Weibull m, es (utilizando los dos puntos indicados en la curva)

$$m = \frac{0.5 - (-2.0)}{\ln(52) - \ln(23.5)} = \frac{2.5}{3.951 - 3.157} = 3.15$$

Este módulo de Weibull bajo de 3.15 sugiere que la cerámica tiene una resistencia a la fractura altamente variable, lo que pone en duda la confiabilidad de su uso en aplicaciones de soporte de carga.

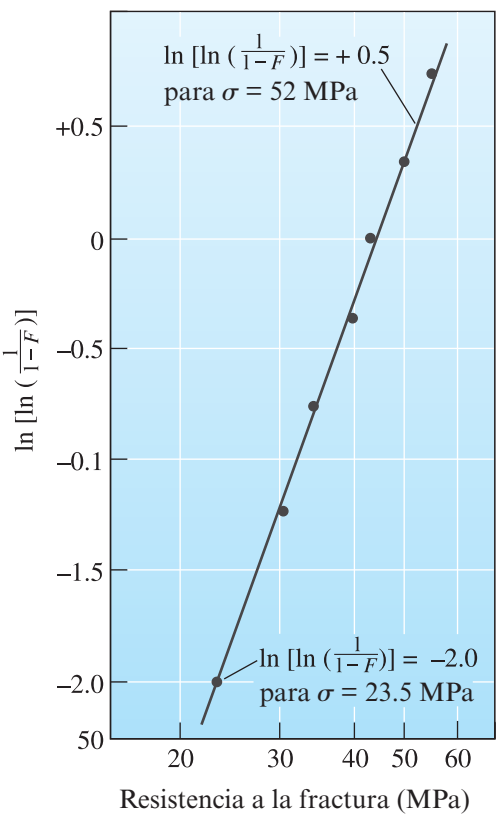


Figura 7-14 Gráfica de la probabilidad acumulativa de la falla en función del esfuerzo de fractura. Observe que la resistencia a la fractura se graficó en una escala logarítmica.

7-6 Fatiga

La *fatiga* es la disminución de la resistencia o falla de un material debido a un esfuerzo repetitivo que puede estar por encima o debajo de la resistencia a la fluencia. Es un fenómeno común en los componentes de soporte de carga en automóviles y aviones, álabes de turbinas, amortiguadores, cigüeñales y demás maquinaria, implantes biomédicos y productos de consumo, como calzado, que están sujetos de manera constante a esfuerzos repetitivos en forma de tensión, compresión, flexión, vibración, expansión térmica y contracción u otros esfuerzos. Con frecuencia, estos esfuerzos están *debajo* de la resistencia del material a la fluencia; sin embargo, cuando el esfuerzo ocurre un número suficiente de veces, ¡provoca falla por fatiga! Una gran parte de las piezas que se encuentran en los depósitos de chatarra de automóviles fallaron por este motivo. La posibilidad de una falla por fatiga es la razón principal por la cual los componentes de aviones tienen una vida finita.

Por lo general, las fallas por fatiga ocurren en tres etapas. Primero, se inicia o nuclea una grieta pequeña, con frecuencia un tiempo bastante después de que comienza la carga. A menudo los sitios de formación de núcleos se localizan en o cerca de la superficie, donde el esfuerzo está a un máximo e incluye defectos de la superficie como rayaduras o picaduras, esquinas afiladas debidas a un diseño o fabricación deficientes, inclusiones, límites de los granos o concentraciones de dislocaciones. Después, la grieta se propaga de manera gradual a medida que la carga se repone. Por último, ocurre una fractura repentina del material cuando la sección transversal restante del material es muy pequeña para soportar la carga aplicada. Por lo tanto, los componentes fallan por fatiga, aun cuando el esfuerzo total aplicado puede permanecer por debajo del límite elástico; a una escala de longitud local, el esfuerzo excede por mucho la resistencia a la tensión. Para que ocurra la fatiga, al menos una parte del esfuerzo sobre el material tiene que ser de tensión. Por lo general, se trata con la fatiga de materiales metálicos y poliméricos.

En las cerámicas por lo general no se considera la fatiga, dado que éstas con frecuencia fallan debido a su baja tenacidad a la fractura. Cualquier grieta por fatiga que pueda formarse reducirá la vida útil de la cerámica, dado que provocará la disminución de la tenacidad a la fractura. En general, las cerámicas se diseñan para carga estática (y no cíclica) y se toma en cuenta el módulo de Weibull.

Los materiales poliméricos también muestran falla por fatiga. El mecanismo de fatiga en los polímeros es distinto al de los materiales metálicos. En los polímeros, a medida que los materiales se sujetan a esfuerzos repetitivos, puede ocurrir un calentamiento considerable cerca de las puntas de las grietas y las interrelaciones entre la fatiga y otro mecanismo, conocido como *termofluencia* (tema que se explica en la sección 7-9), afecta el comportamiento general.

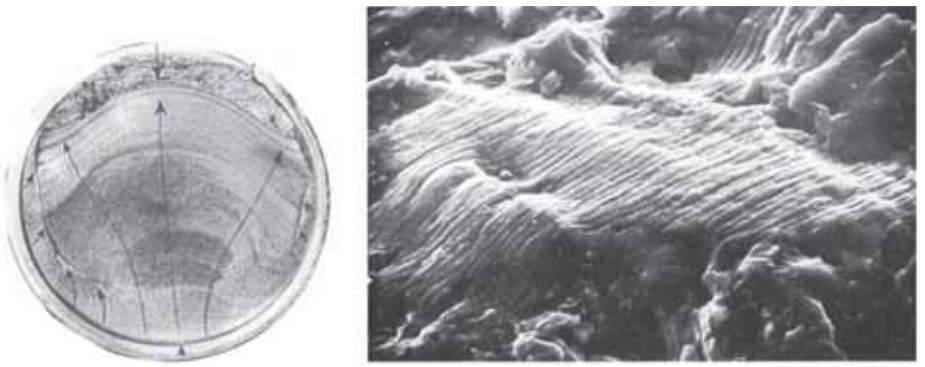
Con frecuencia, las fallas por fatiga son fáciles de identificar. La superficie de la fractura, en particular cerca del origen, por lo general es lisa. La superficie adquiere un carácter más áspero a medida que la grieta original aumenta de tamaño y puede ser fibrosa durante la propagación final de la grieta. Los exámenes microscópicos y macroscópicos revelan una superficie de la fractura que incluye un patrón de marcas de playa y estriaciones (figura 7-15). Por lo general se forman **marcas de playa o de almeja** (figura 7-16) cuando se cambia la carga durante el servicio o ésta es intermitente, lo que quizá permite el tiempo necesario para que se oxide el material interno de la grieta. Las **estraciones**, que

Ejemplo 7-9 *Análisis de la falla por fatiga de un cigüeñal*

El cigüeñal de un motor diesel falla. El examen de la pieza no revela deformación plástica. La superficie de la fractura es lisa. Además, aparecen otras grietas en diversas partes del cigüeñal. ¿Qué tipo de mecanismo de falla ocurrió?

SOLUCIÓN

Dado que el cigüeñal es una pieza rotatoria, la superficie experimenta carga cíclica. La fatiga debe sospecharse de inmediato. La ausencia de deformación plástica respalda la sospecha. Además, la presencia de otras grietas es consistente con la fatiga; las otras grietas no tuvieron tiempo para crecer hasta el tamaño de la que produjo la falla catastrófica. El examen de la superficie de la fractura quizá revelará marcas de playa o estriaciones por fatiga.



a) *b*)

Figura 7-15 Superficie de fractura por fatiga. *a*) A ampliaciones bajas, el patrón de marcas de playa indica la fatiga como el mecanismo de fractura. Las flechas muestran la dirección del crecimiento del frente de la grieta en el origen de la parte inferior de la fotografía. (*C.C. Cottell, "Fatigue Failures with Special Reference to Fracture Characteristics"*, Failure Analysis: The British Engine Technical Reports, *American Society for Metals, 1981, p. 318. Reimpreso con autorización de ASM Internacional. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*) *b*) A ampliaciones muy altas, se observan las estriaciones espaciadas de manera compacta formadas durante la fatiga (1000 ×). *(Reimpresión cortesía de Don Askeland)*

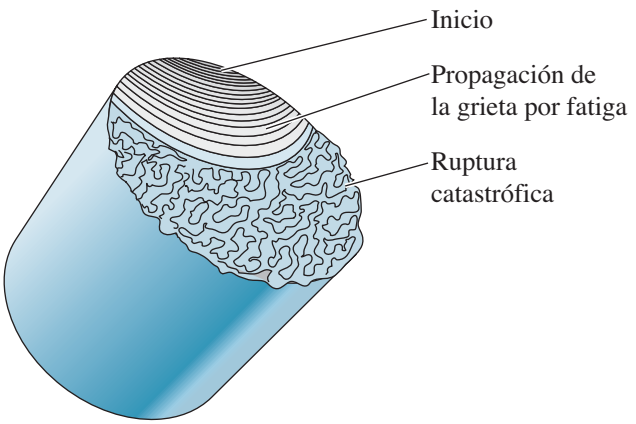


Figura 7-16 Representación esquemática de una superficie de fractura por fatiga de un eje de acero, que muestra la región de inicio, la propagación de la grieta por fatiga (con marcas de playa) y la ruptura catastrófica cuando la longitud de la grieta excede un valor crítico del esfuerzo aplicado.

se forman cuando se cambia la carga durante el servicio o cuando la carga es intermitente, quizás otorgando tiempo para la oxidación en el interior de la grieta, que están en una escala mucho más fina, muestran la posición de la punta de la grieta después de cada ciclo. Las marcas de playa siempre sugieren una falla por fatiga, pero desafortunadamente la ausencia de marcas de playa no descarta la falla por fatiga.

El método convencional más antiguo que se utiliza para medir la resistencia a la fatiga de un material es la **prueba con viga rotatoria en voladizo** (figura 7-17). Un extremo de un espécimen maquinado cilíndrico se monta en una prensa de sujeción accionado por motor. Se suspende un peso del extremo opuesto. El espécimen tiene inicialmente una fuerza de tensión que actúa sobre la superficie superior, mientras que la superficie inferior está comprimida. Después de que el espécimen gira 90°, las partes que estaban originalmente en tensión y compresión ya no tienen esfuerzo que actúe sobre ellas. Después de una media revolución de 180°, el material que se encontraba originalmente en tensión ahora está en compresión. Por lo tanto, el esfuerzo en cualquier punto pasa a través de un ciclo senoidal completo de un esfuerzo de tensión máximo a un esfuerzo de compresión máximo. El esfuerzo máximo que actúa sobre este tipo de espécimen está dado por

$$\pm\sigma = \frac{32\,FL}{\pi d^3} \tag{7-13}$$

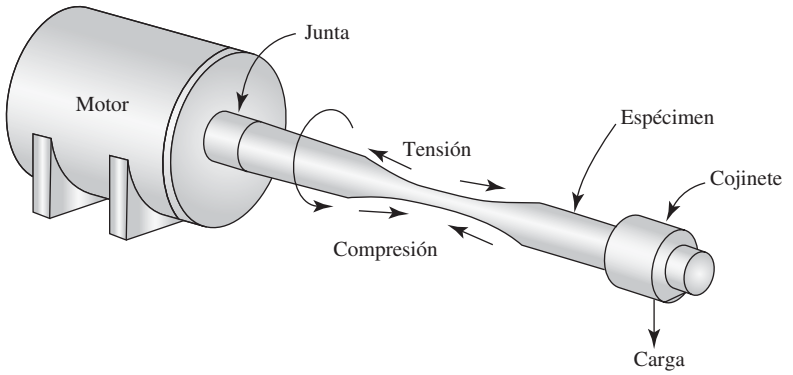


Figura 7-17 Prueba con viga rotatoria en voladizo.

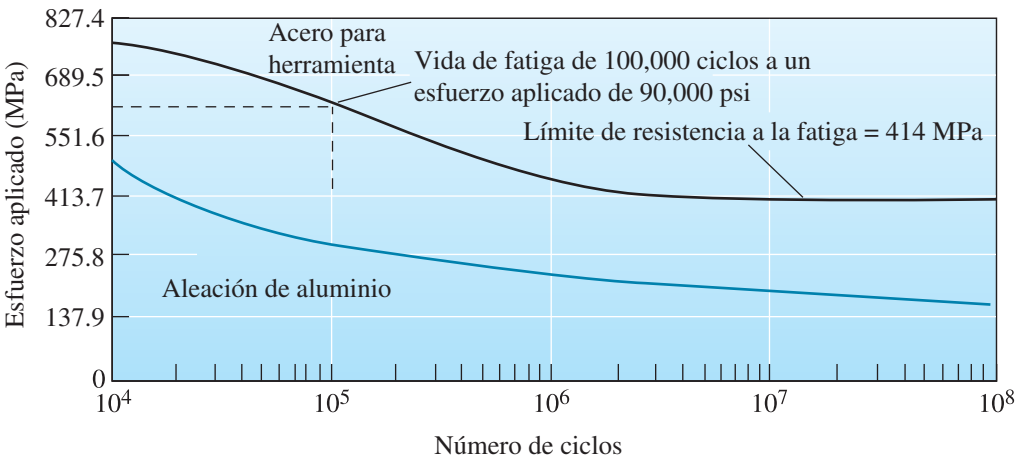


Figura 7-18 Curvas de esfuerzo-número de ciclos a la falla (S-N) en un acero para herramienta y una aleación de aluminio.

donde L es la distancia entre la localización de la fuerza de flexión y el soporte, F la carga y d el diámetro. Observe que la ecuación 7-13 supone que el espécimen tiene una sección transversal uniforme.

Las máquinas más recientes que se usan para realizar pruebas de fatiga se conocen como máquinas de carga directa. En ellas, un sistema servohidráulico, un activador y un sistema de control, gobernados por computadoras, aplican una fuerza, una deflexión, un desplazamiento o una deformación deseados. En algunas también pueden controlarse la temperatura y la atmósfera (por ejemplo, el nivel de humedad).

Después de un número suficiente de ciclos en una prueba de fatiga, el espécimen puede fallar. Por lo general, se prueba una serie de especímenes a distintos esfuerzos aplicados. Los resultados se presentan como una **curva S-N** (también conocida como **curva de Wöhler**), con el esfuerzo (S) graficado en función del número de ciclos (N) a la falla (figura 7-18).

7-7 Resultados de la prueba de fatiga

La **prueba de fatiga** puede indicar cuánto puede sobrevivir una pieza o las cargas máximas permisibles que pueden aplicarse sin provocar la falla. El **límite de resistencia a la fatiga**, es decir, el esfuerzo debajo del cual existe 50% de probabilidades de que la falla por fatiga nunca se produzca, es el criterio preferido de diseño.

Para prevenir que falle la parte de acero para herramienta (figura 7-18), se debe asegurar que el esfuerzo aplicado sea menor de 413.7 MPa. El supuesto de la existencia de un límite de resistencia a la fatiga es un concepto relativamente antiguo. La investigación reciente sobre muchos metales ha demostrado que es probable que no exista un límite de resistencia a la fatiga. También se necesita explicar la presencia de corrosión, sobrecargas ocasionales y otros mecanismos que pueden provocar que el material falle debajo del límite de resistencia a la fatiga. Por lo tanto, los valores de un límite de resistencia a la fatiga deben tratarse con cuidado.

La **vida de fatiga** indica cuánto sobrevive un componente a un esfuerzo específico. Por ejemplo, si el acero para herramienta (figura 7-18) se sujeta de manera cíclica a un esfuerzo aplicado de 620.5 MPa, la vida de fatiga será de 100,000 ciclos. Cuando se conoce el tiempo asociado con cada ciclo, se puede calcular un valor de vida de fatiga en años. La **resistencia a la fatiga** es el esfuerzo máximo ante el cual la fatiga no ocurrirá dentro de un número particular de ciclos, como 500,000,000. Es necesario conocer la resistencia a la fatiga para diseñar con aluminio y polímeros, materiales que no poseen límite de resistencia.

En algunos materiales, entre ellos los aceros, el límite de resistencia es de aproximadamente la mitad de la resistencia a la tensión. La razón entre el límite de resistencia y la resistencia a la tensión se conoce como **razón de resistencia**:

$$\text{Razón de resistencia} = \frac{\text{Resistencia a la tensión}}{\text{Límite de resistencia}} \approx 0.5 \tag{7-14}$$

La razón de resistencia a la fatiga permite calcular las propiedades de fatiga a partir de la prueba de tensión. Los valores de la razón de resistencia a la fatiga son de ~0.3 a 0.4 en el caso de los materiales metálicos distintos de los aceros de baja y media resistencias. *De nuevo, recuerde la nota de advertencia de que mediante una investigación se ha demostrado que existen muchos materiales que carecen de un límite de resistencia.*

La mayoría de los materiales son **sensibles a muescas**, con las propiedades de fatiga particularmente sensibles a las imperfecciones que muestra la superficie. Los defectos de diseño o fabricación concentran los esfuerzos y reducen el límite de resistencia a la fatiga, la resistencia a la fatiga, o la vida de fatiga. En algunas ocasiones se preparan superficies muy pulidas para minimizar la probabilidad de que se produzca una falla por fatiga. El **granallado** es un proceso que se utiliza de manera muy eficaz para incrementar la vida de fatiga de los materiales. Se disparan esferas metálicas pequeñas a la pieza. Este "bombardeo" genera un esfuerzo de compresión residual en la superficie, de manera similar al **templado** de vidrios inorgánicos.

Ejemplo 7-10 *Diseño de una flecha giratoria*

La flecha sólida de acero para herramienta del horno de cemento de la figura 7-18 debe ser de 2.438 m de largo y sobrevivir a la operación continua por un año con una carga aplicada de 55.6 kN. La flecha realiza una revolución por minuto durante la operación. Diseñe una flecha que cumpla de manera satisfactoria estos requisitos.

SOLUCIÓN

La vida de fatiga que requiere este diseño es el número total de ciclos N que la flecha experimentará en un año:

$$N = (1 \text{ ciclo/min})(60 \text{ min/h})(24 \text{ h/día})(365 \text{ días/año}).$$
$$N = 5.256 \times 10^5 \text{ ciclos/año}$$

A partir de la figura 7-18, el esfuerzo aplicado debe ser menor de alrededor de 496.4 MPa. Utilizando la ecuación 7-13, el diámetro de la flecha está dado por

$$\pm\sigma = \frac{32FL}{\pi d^3}$$

$$496.4 \times 10^6 \text{ Pa} = \frac{(32)(55.6 \times 10^3 \text{ N})(2.438 \text{ m})}{\pi d^3}$$

$$d = 0.141 \text{ m}$$

Una flecha con un diámetro de 141 mm debe operar por un año en estas condiciones; sin embargo, quizá deba incorporarse en el diseño un margen significativo de seguridad. Además, podría considerarse producir una flecha que nunca falle.

Se supone un factor de seguridad de 2 (es decir, se supondrá que el nivel de esfuerzo máximo permisible será de 496.4/2 MPa = 248.2 MPa). El diámetro mínimo que se requiere para prevenir la falla sería ahora

$$248.2 \times 10^6 \text{ MPa} = \frac{32(55.6 \times 10^3 \text{ N})(2.438 \text{ m})}{\pi d^3}$$

$$d = 0.177 \text{ m}$$

La selección de una flecha más larga reduce el nivel de esfuerzo, así como la probabilidad de que ocurra la fatiga o retrase la falla. Por supuesto, otras consideraciones podrían ser importantes. Las altas temperaturas y las condiciones corrosivas son inherentes a la producción de cemento. Si la flecha se calienta o es atacada por el ambiente corrosivo, la fatiga se acelera. Por lo tanto, para aplicaciones que involucran la fatiga de componentes, las inspecciones de éstos son muy exhaustivas para evitar una falla catastrófica.

7-8 Aplicación de la prueba de fatiga

Con frecuencia, los componentes son sujetos a condiciones de carga que no dan esfuerzos iguales en tensión y compresión (figura 7-19). Por ejemplo, el esfuerzo máximo durante la compresión puede ser menor que el esfuerzo de tensión máximo. En otros casos, la carga puede estar entre un esfuerzo de tensión máximo y uno mínimo; aquí la curva S-N se presenta como la amplitud del esfuerzo en función del número de ciclos a la falla. La *amplitud del esfuerzo* (σ_a) se define como la mitad de la diferencia entre los esfuerzos máximo y mínimo, y el *esfuerzo medio* (σ_m) se define como el promedio entre los esfuerzos máximo y mínimo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \tag{7-15}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \tag{7-16}$$

Un esfuerzo de compresión se considera un esfuerzo "negativo". Por ello, si el esfuerzo de tensión máximo es de 345 MPa y el esfuerzo mínimo es un esfuerzo de compresión de 68.95 MPa, aplicando las ecuaciones 7-15 y 7-16, la amplitud del esfuerzo es de 206.8 MPa y el esfuerzo medio es de 20,000 psi.

A medida que aumenta el esfuerzo medio, la amplitud del esfuerzo debe disminuir para que el material soporte los esfuerzos aplicados. La condición puede resumirse por medio de la relación de Goodman:

$$\sigma_a = \sigma_{fs}\left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{UTS}}\right)\right] \tag{7-17}$$

donde σ_{fs} es la resistencia a la fatiga deseada para un esfuerzo medio de cero y σ_{RTE} es la resistencia a la tensión del material. Por lo tanto, en una prueba de fatiga con viga rotatoria en voladizo, donde el esfuerzo medio es cero, puede tolerarse sin fatiga una amplitud del esfuerzo relativamente grande. Sin embargo, si el ala de un avión se carga cerca de su resistencia a la fluencia, incluso las vibraciones de amplitud pequeña pueden provocar que se produzca y crezca una grieta por fatiga.

Rapidez de crecimiento de una grieta

En muchos casos un componente puede no estar en riesgo de falla, aun cuando se presente una grieta. Para calcular cuándo podría ocurrir la falla, la rapidez de propagación de una grieta adquiere importancia. La figura 7-20 mues-

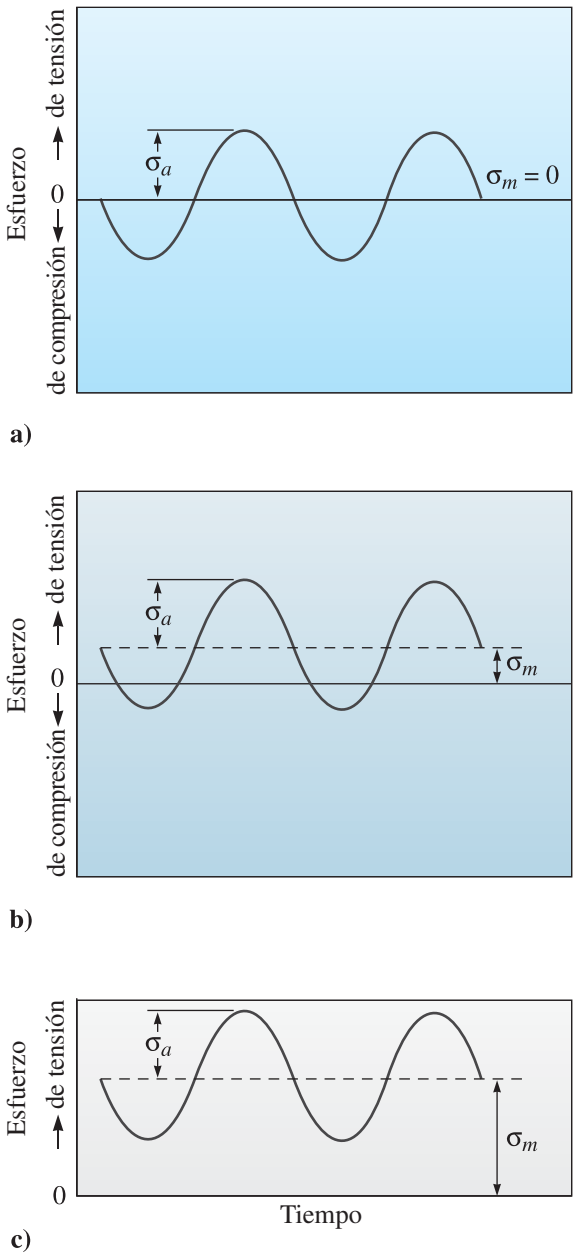


Figura 7-19 Ejemplos de ciclos de esfuerzo. *a*) Esfuerzos de tensión y compresión iguales, *b*) esfuerzo de tensión mayor que el esfuerzo de compresión y *c*) todo el esfuerzo es de tensión.

tra la velocidad de crecimiento de una grieta en función del intervalo del factor de intensidad del esfuerzo ΔK, el cual caracteriza la geometría de la grieta y la amplitud del esfuerzo. Debajo del umbral del ΔK, una grieta no crece; en caso de intensidades del esfuerzo ligeramente mayores, las grietas crecen con lentitud; y a intensidades del esfuerzo aún mayores, una grieta crece a una rapidez dada por

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \tag{7-18}$$

En esta ecuación, C y n son constantes empíricas que dependen del material. Por último, cuando ΔK es aún mayor, las grietas crecen de manera rápida e inestable hasta que ocurre la fractura.

La rapidez de crecimiento de una grieta se incrementa a medida que aumenta de tamaño, como se predice a partir del factor de intensidad del esfuerzo (ecuación 7-1):

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}} = f\sigma_{\text{máx}}\sqrt{\pi a} - f\sigma_{\text{mín}}\sqrt{\pi a} = f\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \tag{7-19}$$

Si el esfuerzo cíclico $\Delta\sigma$ ($\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}$) no cambia, entonces aumenta la longitud de la grieta a, lo mismo que ΔK y la velocidad de crecimiento de la grieta da/dN. Cuando se utiliza esta expresión,

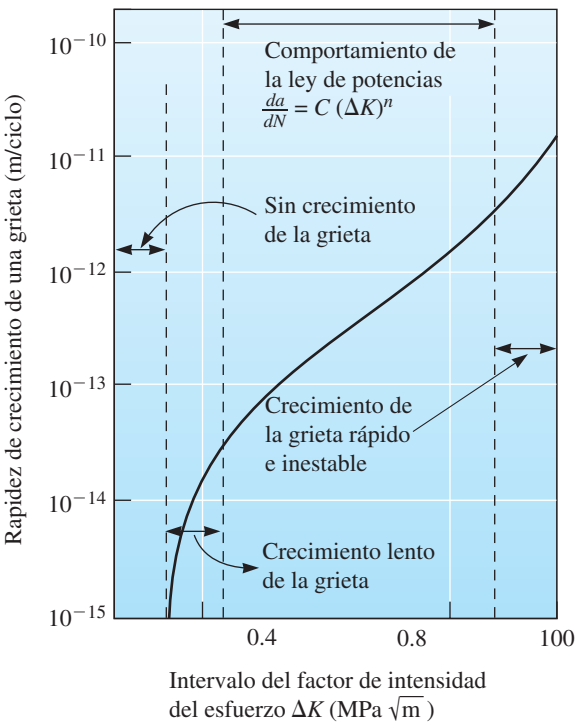


Figura 7-20 Rapidez de crecimiento de una grieta en función del intervalo del factor de intensidad del esfuerzo en un acero de alta resistencia. En el caso de este acero, $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ en las unidades que se muestran.

debe observarse que una grieta no se propagará durante la compresión. Por lo tanto, si $\sigma_{\text{mín}}$ es de compresión, o menor de cero, entonces $\sigma_{\text{mín}}$ debe establecerse igual a cero.

Conocer la rapidez de crecimiento de una grieta ayuda para diseñar componentes y evaluar de manera no destructiva para determinar si una grieta significa un riesgo inminente para la estructura. Una aproximación para este problema es calcular el número de ciclos que se requieren antes de que ocurra la falla. Reacomodando la ecuación 7-18 y sustituyendo ΔK:

$$dN = \frac{da}{Cf^n \Delta\sigma^n \pi^{n/2} a^{n/2}}$$

Si se integra esta expresión entre el tamaño inicial de una grieta y el tamaño de la grieta que se requiere para que ocurra la fractura, se encuentra que

$$N = \frac{2[(a_c)^{(2-n)/2} - (a_i)^{(2-n)/2}]}{(2-n)Cf^n \Delta\sigma^n \pi^{n/2}} \tag{7-20}$$

donde a_i es el tamaño inicial de la imperfección y a_c el tamaño de la imperfección que se requiere para que se produzca la fractura. Si se conocen las constantes n y C de la ecuación 7-18 del material, se puede calcular el número de ciclos que se requieren para la falla de un esfuerzo cíclico dado.

Ejemplo 7-11 *Diseño de una placa resistente a la fatiga*

Una placa de acero de alta resistencia (figura 7-20), con una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de 80 MPa $\sqrt{\text{m}}$, se carga de manera alterna en tensión a 500 MPa y una compresión de 60 MPa. La placa debe sobrevivir 10 años, con el esfuerzo aplicado a una frecuencia de una vez cada 5 minutos. Diseñe un procedimiento de fabricación y de prueba que asegure que la pieza servirá como se pretende. Suponga un factor de geométrico $f = 1.0$ en todas las imperfecciones.

SOLUCIÓN

Para diseñar la capacidad de fabricación y prueba, debe determinarse el tamaño máximo de las imperfecciones que podría provocar la falla dentro del periodo de 10 años. El tamaño crítico de la grieta según la tenacidad a la fractura y el esfuerzo máximo es

$$K_{Ic} = f\sigma\sqrt{\pi a_c}$$
$$80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} = (1.0)(500 \text{ MPa})\sqrt{\pi a_c}$$
$$a_c = 0.0081 \text{ m} = 8.1 \text{ mm}$$

El esfuerzo máximo es de 500 MPa; sin embargo, el esfuerzo mínimo es cero, no 60 MPa en compresión, debido a que las grietas no se propagan en compresión. Por lo tanto, $\Delta\sigma$ es

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} = 500 - 0 = 500 \text{ MPa}.$$

Se debe determinar el número mínimo de ciclos que la placa debe soportar:

$$N = [1 \text{ ciclo}/(5 \text{ mín})](60 \text{ mín/h})(24 \text{ h/días})(365 \text{ d/año})(10 \text{ años})$$
$$N = 1{,}051{,}200 \text{ ciclos}$$

Si se supone que $f = 1.0$ en todas las longitudes de las grietas y al observar que $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ a partir de la figura 7-20 y la ecuación 7-20, entonces

$$1{,}051{,}200 = \frac{2[(0.0081)^{(2-3.2)/2} - (a_i)^{(2-3.2)/2}]}{(2 - 3.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)^{3.2}(500)^{3.2}\pi^{3.2/2}}$$
$$1{,}051{,}200 = \frac{2[18 - a_i^{-0.6}]}{(-1.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)(4.332 \times 10^{8})(6.244)}$$
$$a_i = 1.82 \times 10 - 6\text{m} = 0.00182 \text{ mm en el caso de imperfecciones en la superficie}$$
$$2a_i = 0.00364 \text{ mm en el caso de imperfecciones internas}$$

El proceso de fabricación debe producir imperfecciones en la superficie menores de 0.00182 mm de longitud. Además, las pruebas no destructivas deben poder asegurar que no se presenten grietas que se aproximen a esta longitud.

Efectos de la temperatura

A medida que aumenta la temperatura del material, disminuyen la vida de fatiga y el límite de resistencia a la fatiga. Además, un cambio cíclico de temperatura propicia la falla por fatiga térmica; cuando un material se calienta de una manera no uniforme, algunas partes de la estructura se expanden más que otras. Esta expansión no uniforme genera un esfuerzo dentro del material y cuando después la estructura se enfría y se contrae se imponen los esfuerzos del signo opuesto. Como consecuencia de los esfuerzos y deformación inducidos térmicamente, con el tiempo se puede producir la fatiga. La frecuencia con la que se aplica el esfuerzo también influye en el comportamiento de la fatiga. En particular, los esfuerzos de alta frecuencia pueden provocar que los materiales poliméricos se calienten; cuando aumentan las temperaturas, los polímeros fallan de manera más rápida. También deben considerarse los efectos químicos de la temperatura (por ejemplo, la oxidación).

7-9 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión por esfuerzo

Si se aplica un esfuerzo a un material a una alta temperatura, éste puede estirarse y con el tiempo fallar, aun cuando el esfuerzo aplicado sea *menor* que la resistencia a la fluencia a esa temperatura. A la deformación permanente dependiente del tiempo bajo una carga constante o un esfuerzo constante y a temperaturas altas se le conoce como **termofluencia**. Un gran número de fallas que ocurren en los componentes que se utilizan a altas temperaturas puede atribuirse a la termofluencia o a una combinación de termofluencia y fatiga. La difusión, el deslizamiento o ascenso de las dislocaciones o el deslizamiento de los límites de granos pueden contribuir a la termofluencia de los materiales

metálicos. En el caso de los metales y aleaciones dúctiles sujetos a la termofluencia, la fractura es acompañada por formación de cuellos, nucleación (formación de núcleos) y coalescencia o deslizamiento de los límites de los granos. Los materiales poliméricos también muestran termofluencia.

Un material se considera que falla por termofluencia, incluso si aún *no* se ha fracturado. Cuando un material fluye y al final se rompe, la fractura se define como *ruptura por esfuerzo*. Por lo general, las fracturas dúctiles de ruptura por esfuerzo incluyen formación de cuellos y la presencia de muchas grietas que no tuvieron la oportunidad de producir la fractura final. Además, los granos ubicados cerca de la superficie de la fractura tienden a prolongarse. Por lo general, las fallas dúctiles de ruptura por esfuerzo ocurren a rapidez de fluencia alta y a temperaturas de exposición relativamente bajas y tienen tiempos de ruptura cortos. Las fallas frágiles de ruptura por esfuerzo muestran poca formación de cuellos y ocurren con más frecuencia a velocidades de fluencia menores y a altas temperaturas. Se observan granos equiaxiales cerca de la superficie de la fractura. Por lo general, la falla frágil ocurre debido a la formación de huecos en la intersección de tres límites de los granos y la precipitación de huecos adicionales a lo largo de dichos límites por el proceso de difusión (figura 7-21).

Corrosión bajo esfuerzo

Este tipo de corrosión es un fenómeno en el que los materiales reaccionan con las sustancias químicas corrosivas que hay en el ambiente. Este proceso conduce a la formación de grietas y a la disminución de la resistencia. La corrosión bajo esfuerzo puede ocurrir a esfuerzos muy por debajo de la resistencia a la fluencia del material metálico, cerámico o vítreo, debido al ataque que lleva a cabo un medio corrosivo. En los materiales metálicos se producen grietas por corrosión profundas y finas, aun cuando el metal como un todo muestre poco ataque uniforme. Los esfuerzos pueden aplicarse externamente o ser esfuerzos residuales almacenados. Con frecuencia, las fallas de corrosión bajo esfuerzos se estudian por medio del examen microestructural del metal circundante. Por lo general, se observa la ramificación extensiva de las grietas a lo largo de

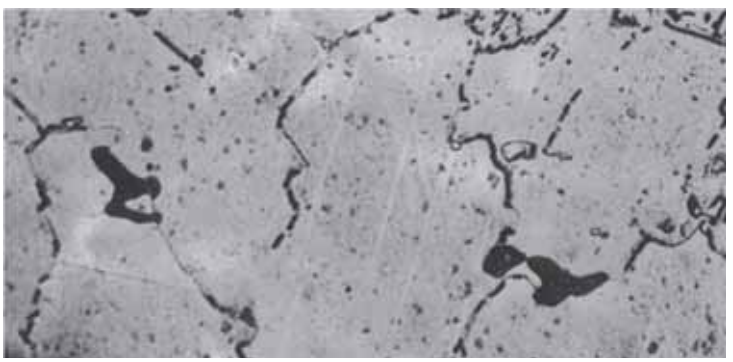


Figura 7-21 Cavidades de termofluencia formadas en los límites de granos en un acero inoxidable austenítico (500 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 7, Metallography and Microstructure (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

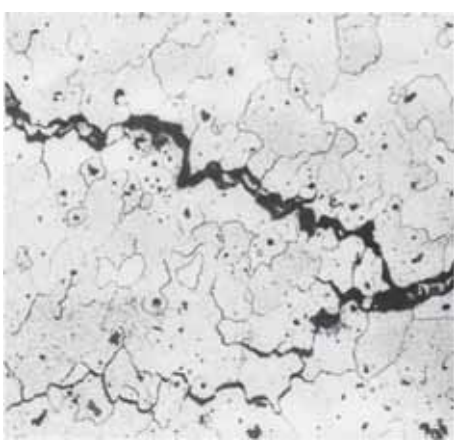


Figura 7-22 Micrografía de un metal cerca de una fractura por corrosión bajo esfuerzo, que muestra muchas grietas intergranulares formadas como resultado del proceso de corrosión (200 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 7, Metallography and Microstructure (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

los límites de los granos (figura 7-22). El lugar en el que las grietas comienzan puede identificarse por medio de la presencia de un producto de corrosión.

Ejemplo 7-12 *Análisis de la falla de un tubo*

Un tubo de titanio que se usa para transportar un material corrosivo a 400°C falla después de varios meses. ¿Cómo determinaría la causa de la falla?

SOLUCIÓN

Dado que transcurrió cierto tiempo a una temperatura alta antes de que ocurriera la falla, primero podría sospecharse de que un mecanismo de termofluencia o de corrosión bajo esfuerzo provocó la falla. Por ello, es recomendable realizar un examen microscópico del material cerca de la superficie de la fractura. Si se observan muchas grietas pequeñas ramificadas que se alejan de la superficie, existe una gran posibilidad de que se haya producido la corrosión bajo esfuerzo. Si los granos cercanos a la superficie de la fractura están alargados, con muchos huecos entre ellos, lo más probable es que la culpable sea la termofluencia.

Los vidrios inorgánicos de silicato son especialmente propensos a fallar cuando reaccionan con vapor de agua. Es bien conocido que la resistencia de las fibras de sílice o de los productos de vidrio de sílice es muy alta cuando estos materiales se protegen del vapor de agua. A medida que los componentes de las fibras o del vidrio de sílice se exponen a dicho vapor, comienzan las reacciones de corrosión que conducen a la formación de fisuras en la superficie, lo cual, por último, provoca que las grietas crezcan cuando se aplica un esfuerzo. Se aplican recubrimientos poliméricos a las fibras ópticas, a fin de evitar que reaccionen con el vapor. En el caso de los vidrios voluminosos, se utilizan tratamientos térmicos especiales como el templado, proceso que produce un esfuerzo de compresión total sobre la superficie del vidrio. Por lo tanto, aún si la superficie del vidrio reacciona con el vapor, las grietas no crecen, dado que el esfuerzo total sobre la superficie es compresivo. Si surgiese una imperfección que penetrara en la región de esfuerzo compresivo sobre la superficie, el vidrio templado se haría pedazos. Este material se usa de manera amplia en las aplicaciones de construcción y para automóviles.

7-10 Evaluación del comportamiento de la termofluencia

Para determinar las características de la termofluencia de un material se debe aplicar un esfuerzo constante a un espécimen calentado en una **prueba de termofluencia**. Tan pronto como se aplica el esfuerzo, el espécimen se estira de manera elástica una pequeña cantidad ε_0 (figura 7-23), que depende del esfuerzo aplicado y del módulo de elasticidad del material a una temperatura alta. La prueba de termofluencia también puede llevarse a cabo bajo una carga constante y es importante desde el punto de vista del diseño de ingeniería.

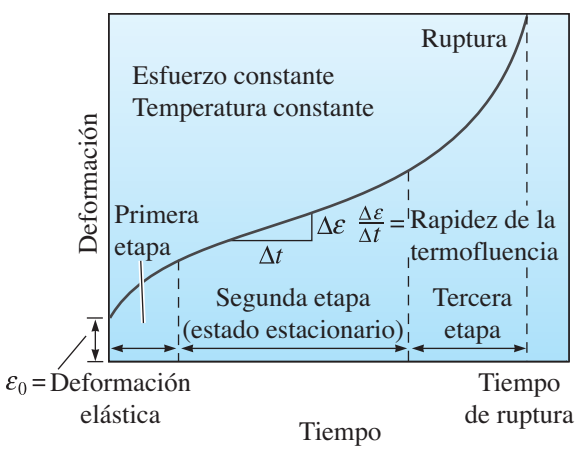


Figura 7-23 Curva de termofluencia común que muestra la deformación producida como una función del tiempo a un esfuerzo y temperatura constantes.

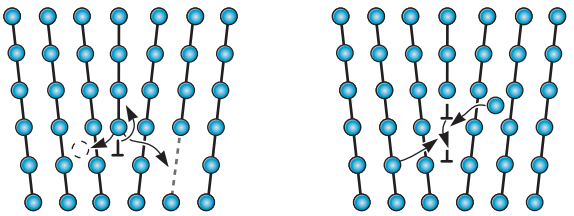


Figura 7-24 Las dislocaciones pueden ascender *a*) cuando los átomos dejan la línea de dislocaciones para crear intersticios o para llenar vacancias, o *b*) cuando los átomos se unen a la línea de dislocaciones para crear vacancias o eliminar intersticios.

Ascenso de las dislocaciones

Las altas temperaturas permiten que asciendan las dislocaciones que se producen en un material metálico. Durante el ascenso, los átomos, por difusión, se mueven hacia o desde la línea de dislocaciones, lo que provoca que éstas se muevan en una dirección que es perpendicular, no paralela, al plano de deslizamiento (figura 7-24). La dislocación escapa de las imperfecciones de red, continúa deslizándose y provoca una deformación adicional del espécimen, incluso cuando los esfuerzos aplicados son bajos.

Tiempos de la velocidad de termofluencia lenta y de ruptura

Durante la prueba de termofluencia, la deformación o elongación se mide como una función del tiempo y se grafica para obtener la curva de termofluencia (figura 7-23). En la primera etapa de la termofluencia de los metales, muchas dislocaciones ascienden, es decir, se alejan de los obstáculos, se deslizan y contribuyen a la deformación. Con el tiempo, la velocidad a la que las dislocaciones ascienden alejándose de los obstáculos es igual a la velocidad a la que las dislocaciones son bloqueadas por otras imperfecciones. Este proceso conduce a una segunda etapa, o estado estacionario, de la termofluencia. La pendiente de la parte del estado estacionario de la curva de termofluencia es la **velocidad de termofluencia**:

$$\text{Velocidad de termofluencia} = \frac{\Delta \text{ deformación}}{\Delta \text{ tiempo}} \tag{7-21}$$

Finalmente, durante la tercera etapa de la termofluencia, comienza la formación de cuellos, aumenta el esfuerzo y el espécimen se deforma a una rapidez acelerada hasta que ocurre la falla. El tiempo que se requiere para que ocurra la falla es el **tiempo de ruptura**. Un esfuerzo mayor o una temperatura mayor reducen el tiempo de ruptura y aumentan la velocidad de termofluencia (figura 7-25).

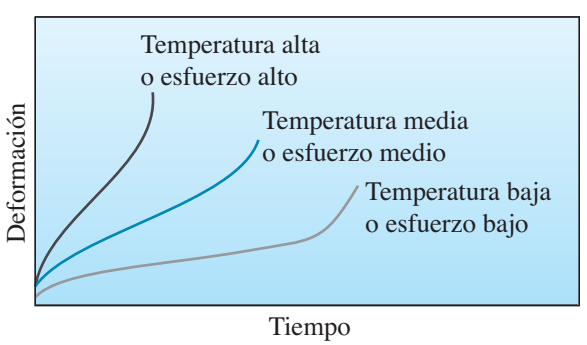


Figura 7-25 Efecto de la temperatura o del esfuerzo aplicado sobre la curva de termofluencia.

A la velocidad de termofluencia y al tiempo de ruptura (t_r) le siguen relaciones que toman en cuenta la influencia combinada del esfuerzo y la temperatura aplicados:

$$\text{Velocidad de termofluencia} = C\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \tag{7-22}$$

$$t_r = K\sigma^m \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right), \tag{7-23}$$

donde R es la constante de los gases, T la temperatura en kelvins, y C, K, n y m son constantes para el material. Q_c es la energía de activación de la termofluencia y Q_r la energía de activación de la ruptura. En particular, Q_c se relaciona con la energía de activación de la autodifusión cuando el ascenso de las dislocaciones es importante.

En las cerámicas cristalinas, otros factores, entre ellos el deslizamiento de los límites de los granos y la formación de núcleos de microgrietas, son particularmente importantes. Con frecuencia, un material no cristalino o vítreo está presente en los límites de los granos; la energía de activación que se requiere para que el vidrio se deforme es baja, lo que conduce a altas velocidades de termofluencia en comparación con las cerámicas totalmente cristalinas. Por la misma razón, la termofluencia ocurre a una alta velocidad en los vidrios cerámicos y en los polímeros amorfos.

7-11 Uso de datos de la termofluencia

Las **curvas de esfuerzo-ruptura**, que se muestran en la figura 7-26*a*), calculan el tiempo de vida esperado de un componente ante una combinación particular de esfuerzo y temperatura. El **parámetro de Larson-Miller**, que se ilustra en la figura 7-26*b*), se utiliza para consolidar la relación esfuerzo-temperatura-tiempo de ruptura en una sola curva. El parámetro de Larson-Miller (*L.M.*) es

$$L.M. = \left(\frac{T}{1000}\right)(A + B \ln t) \tag{7-24}$$

donde T está en kelvins, t es el tiempo en horas, y A y B son constantes del material.

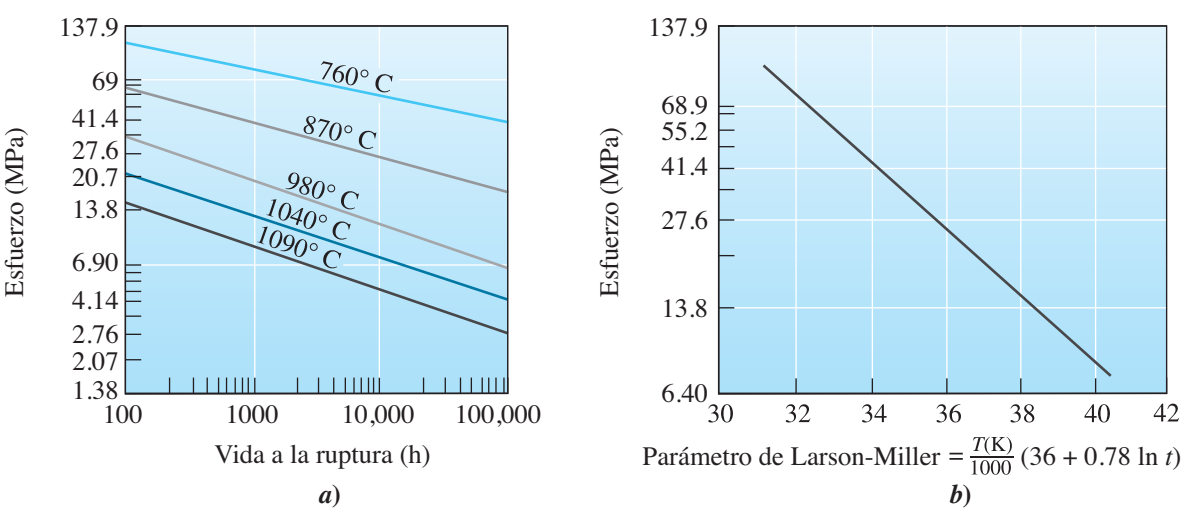


Figura 7-26 Resultados de una serie de pruebas de termofluencia. *a*) Curvas de esfuerzo-ruptura de una aleación de hierro-cromo-níquel y *b*) parámetro de Larson-Miller del hierro colado dúctil.

Ejemplo 7-13 *Diseño de eslabones de una cadena*

Diseñe una cadena de hierro colado dúctil (figura 7-27) para operar en un horno que se usa para cocer ladrillos cerámicos. La cadena se utilizará por cinco años a 600°C con una carga aplicada de 22.24 kN.

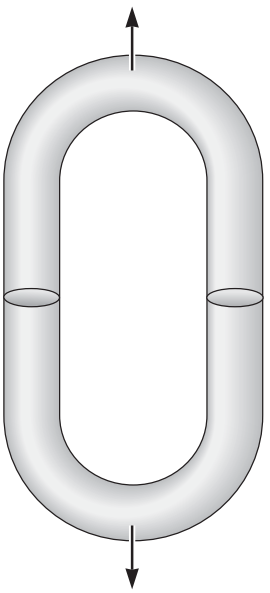


Figura 7-27 Esquema del eslabón de una cadena (ejemplo 7-13).

SOLUCIÓN

A partir de la figura 7-26*b*), el parámetro de Larson-Miller del hierro colado dúctil es

$$L.M. = \frac{T(36 + 0.78 \ln t)}{1000}$$

La cadena debe sobrevivir cinco años o

$$t = (24\text{h/día})(365\text{días/año})(5\text{ años}) = 43{,}800\text{ h}$$

$$L.M. = \frac{(600 + 273)[36 + 0.78 \ln(43{,}800)]}{1000} = 38.7$$

A partir de la figura 7-26*b*), el esfuerzo aplicado no debe ser mayor de 1,800 psi (12.4 MPa).

Si suponemos un **factor de seguridad** de 2, esto significará que el esfuerzo aplicado no debe ser mayor de 1,800/2 = 900 psi (6.2 MPa).

El área total de la sección transversal de la cadena que se requiere para soportar la carga de 22.24 kN es

$$A = F/S = \frac{22.24 \times 10^3\text{ N}}{6.2 \times 10^6\text{ Pa}} = 3.587 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

El área de la sección transversal de cada "mitad" del eslabón de hierro es entonces de $1.794 \times 10^{-3}\text{m}^2$, y suponiendo una sección transversal circular

$$d^2 = (4/\pi)A = (4/\pi)(1.794 \times 10^{-3}) = 2.284 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

$$d = 47.8\text{ mm}$$

Resumen

- La tenacidad señala la capacidad de los materiales para absorber energía antes de que se fracturen. La tenacidad a la tensión es igual al área bajo la curva esfuerzo verdadero-deformación

verdadera. La tenacidad al impacto se mide por medio de la prueba de impacto. La tenacidad a la fractura describe con qué facilidad se propaga una grieta o una imperfección en un material.

- La estadística de Weibull se utiliza para describir y caracterizar la variabilidad de la resistencia de los materiales frágiles. El módulo de Weibull es una medida de la variabilidad de la resistencia de un material.
- La prueba de fatiga permite comprender cómo se comporta un material cuando se le aplica un esfuerzo cíclico. El conocimiento de la velocidad de crecimiento de una grieta puede ayudar a determinar la vida de fatiga.
- El análisis microestructural de las superficies de la fractura puede conducir a comprender mejor el origen y la causa de la fractura. Distintas características microestructurales están asociadas con la fractura dúctil y frágil, al igual que con la falla por fatiga.
- La prueba de termofluencia proporciona información sobre la capacidad de soporte de carga de un material a altas temperaturas. La velocidad de termofluencia y el tiempo de ruptura son propiedades importantes que se obtienen a partir de estas pruebas.

Glosario

Ascenso Movimiento de una dislocación perpendicular a su plano de deslizamiento por la difusión de átomos hacia o desde la línea de dislocaciones.

Corrosión bajo esfuerzo Fenómeno en el que los materiales reaccionan con las sustancias químicas corrosivas en el ambiente, lo que conduce a la formación de grietas y a la disminución de la resistencia.

Curva de esfuerzo-ruptura Método para reportar los resultados de una serie de pruebas de termofluencia graficando el esfuerzo aplicado en función del tiempo de ruptura.

Curva de Wöhler Vea curva S-N.

Curva S-N (también conocida como curva de Wöhler) Gráfica que muestra la relación entre el esfuerzo aplicado y el número de ciclos hasta la falla por fatiga.

Delaminación Proceso por medio del cual comienzan a separarse las distintas capas en un compuesto.

Distribución de Weibull Distribución matemática que muestra la probabilidad de falla o de supervivencia de un material como una función del esfuerzo.

Estriaciones Patrones que se observan en la superficie fracturada de una muestra fatigada. Son visibles a una escala mucho más fina que las marcas de playa y muestran la posición de la punta de la grieta después de cada ciclo.

Factor de seguridad Razón del nivel de esfuerzo para el que se diseña un componente al nivel de esfuerzo real experimentado.

Fractura concoidal Superficie de la fractura que contiene una zona especular lisa cerca del origen de la fractura con líneas de rasgado que comprimen el resto de la superficie. Este tipo es común entre los materiales amorfos.

Granallado Proceso en el que se le disparan esferas metálicas a un componente. Este "bombardeo" genera un esfuerzo de compresión residual en la superficie de un componente e incrementa la vida de fatiga.

Imperfección de Griffith Grieta o imperfección en un material que concentra y magnifica el esfuerzo aplicado.

Intergranular Entre los granos o a lo largo de los límites de granos.

Límite de resistencia a la fatiga Concepto antiguo que definía un esfuerzo debajo del cual un material no fallaría en una prueba de fatiga. Ciertos factores, como la corrosión o la sobrecarga ocasional, pueden provocar que los materiales fallen a esfuerzos debajo del límite supuesto de resistencia.

Marcas de playa o de almeja Patrones que con frecuencia se observan en un componente sujeto a la fatiga. Por lo general se forman cuando se cambia la carga durante el servicio o cuando la carga es intermitente, lo que puede permitir que transcurra el tiempo suficiente para que la parte interna de la grieta se oxide.

Mecánica de la fractura Estudio de la capacidad de un material para soportar un esfuerzo en presencia de una imperfección.

Microhuecos Desarrollo de pequeños orificios en un material. Se forman cuando un gran esfuerzo provoca la separación del metal en los límites de los granos o en las interfaces entre el metal y las inclusiones.

Módulo de Weibull Parámetro que se relaciona con la distribución de Weibull. Es un indicador de la variabilidad de la resistencia de los materiales que resulta de una distribución de los tamaños de las imperfecciones.

Parámetro de Larson-Miller Parámetro que se utiliza para relacionar el esfuerzo, la temperatura y el tiempo de ruptura en la termofluencia.

Patrón en forma de V (Chevron) Característica de fractura común que producen los frentes separados de grietas que se propagan en diferentes niveles del material.

Prueba con viga rotatoria en voladizo Método para probar la fatiga que permite una carga cíclica completamente invertida.

Prueba de fatiga Mide la resistencia de un material a la falla cuando se aplica de manera repetida un esfuerzo debajo de la resistencia a la fluencia.

Prueba de termofluencia Mide la resistencia de un material a la deformación y falla cuando se sujeta a una carga estática debajo de la resistencia a la fluencia a una temperatura alta.

Rapidez de termofluencia Velocidad a la que un material se deforma cuando se le aplica un esfuerzo a una temperatura alta.

Razón de resistencia a la fatiga Limite de resistencia dividido entre la resistencia a la tensión del material. En el caso de muchos metales ferrosos, la razón es alrededor de 0.5. Vea la nota de advertencia acerca del límite de resistencia a la fatiga.

Resistencia a la fatiga Esfuerzo que se requiere para provocar la falla por fatiga a un número dado de ciclos, por ejemplo, 500 millones.

Sensibilidad a la muesca Mide el efecto de una muesca, rayadura u otra imperfección sobre las propiedades del material, como la tenacidad o la vida de fatiga.

Templado Medida cualitativa de la energía que se requiere para provocar la fractura de un material.

Templadura Tratamiento térmico para vidrios que lo hace más seguro; lo hace creando una capa de esfuerzo compresiva en la superficie.

Tenacidad a la fractura Resistencia de un material a fallar en presencia de una imperfección.

Termofluencia Deformación permanente dependiente del tiempo a altas temperaturas, que ocurre a una carga o a un esfuerzo constantes.

Tiempo de ruptura Tiempo que se requiere para que falle un espécimen por termofluencia a una temperatura y un esfuerzo particulares.

Transgranular Significa a través de los granos (por ejemplo, una fractura transgranular sería la fractura en la que las grietas pasarían a través de los granos).

Vida de fatiga Número de ciclos permitidos a un esfuerzo en particular antes de que un material falle por fatiga.

Problemas

Sección 7-1 Mecánica de la fractura

Sección 7-2 Importancia de la mecánica de la fractura

7-1 La alúmina (Al_2O_3) es una cerámica frágil con tenacidad baja. Suponga que pudieran insertarse dentro de ella fibras de carburo de silicio, SiC, otra cerámica frágil con tenacidad baja. Si se pudiera, ¿se vería afectada la tenacidad del compuesto con matriz cerámica? Explique su respuesta.

7-2 ¿Cuáles son las diferencias entre el factor de tenacidad a la fractura (K_I) y la tenacidad a la fractura en estado de deformación plana (K_{Ic})? Explique su respuesta.

7-3 Una pieza del ala de una aeronave está fabricada con una aleación de aluminio que tiene una tenacidad a la fractura de deformación plana de 26 MPa $\sqrt{\text{m}}$. Se ha determinado que el material se fractura a una tensión de 112 MPa cuando la longitud de la grieta alcanza un máximo de 8.6 mm. Calcule el nivel de esfuerzo al que se producirá la fractura a una longitud crítica de grieta interna de 6.0 mm del mismo componente y la misma aleación.

7-4 Calcule la longitud máxima permisible de una grieta en un componente de aleación de titanio que se carga a una tensión igual a la mitad de su resistencia a la fluencia. Suponga que el factor geométrico es 1.5. La resistencia a la fluencia de

esta aleación es de 910 MPa y la tenacidad a la fractura es de 54.95 MPa $\sqrt{m}$.

7-5 Una aleación de acero que tiene una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de 55 MPa $\sqrt{m}$ se expone a un esfuerzo de 1,020 MPa. Si se conoce que la superficie máxima de la grieta es de 0.5 mm de longitud, ¿se fracturará esta pieza? Suponga que el factor geométrico es de 1.0.

7-6 Un compuesto con matriz cerámica contiene imperfecciones internas de 0.01 mm de longitud. La tenacidad a la fractura en estado de deformación plana del compuesto es de 45 MPa $\sqrt{m}$ y la resistencia a la tensión es de 550 MPa. ¿El esfuerzo ocasionará que el compuesto falle antes de que se alcance la resistencia a la tensión? Suponga que $f = 1$.

7-7 Una aleación de aluminio que tiene una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de 27.47 MPa $\sqrt{m}$ falla cuando se le aplica un esfuerzo de 289.6 MPa. La observación de la superficie de la fractura indica que ésta comenzó en la superficie de la pieza. Calcule el tamaño de la imperfección que inició la fractura. Suponga que $f = 1.1$.

7-8 Un polímero que contiene imperfecciones internas de 1 mm de longitud falla a un esfuerzo de 25 MPa. Determine la tenacidad a la fractura en estado de deformación plana del polímero. Suponga que $f = 1$.

7-9 Una pieza cerámica para el motor de un jet tiene una resistencia a la fluencia de 517 MPa y una tenacidad a la fractura en estado de deformación plana de 5.5 MPa $\sqrt{m}$. Para asegurarse de que la pieza no falle, se planea asegurar que el esfuerzo máximo aplicado sea de sólo un tercio de la resistencia a la fluencia. Se utiliza una prueba no destructiva que detectará cualquier imperfección interna mayor de 1.27 mm de largo. Suponiendo que $f = 1.4$, ¿esta prueba no destructiva posee la sensibilidad que se requiere? Explique su respuesta.

7-10 Un proceso de fabricación que de manera no intencionada introduce grietas en la superficie de una pieza se utilizó para producir componentes de soporte de carga. El diseño requiere que la pieza pueda soportar un esfuerzo de 450 MPa. El componente falló de manera catastrófica en el servicio.

Usted es el ingeniero de análisis de fallas que debe determinar si el componente falló debido a una sobrecarga en el servicio o por las imperfecciones del proceso de fabricación. El fabricante asegura que el componente se pulió para eliminar las grietas y se inspeccionó para asegurar que las grietas en la superficie no fuesen mayores de 0.5 mm. El fabricante cree que el componente falló debido a un error del operador.

Se ha verificado de forma independiente que la pieza de 5 cm de diámetro fue sujeta a una carga de tensión de 1 MN (10^6 N).

El material a partir del cual se fabricó el componente tiene una tenacidad a la fractura de 75 MPa $\sqrt{m}$ y una resistencia a la tensión última de 600 MPa. Suponga grietas externas para las que $f = 1.12$.

a) ¿Quién es el responsable de que la pieza fallara, el fabricante o el operador? Muestre sus trabajos que sostienen ambas hipótesis.

b) Además del análisis que presentó en *a*), ¿qué características podría buscar en las superficies de la fractura que soporten su conclusión?

7-11 Explique cómo puede obtenerse la tenacidad a la fractura de las cerámicas utilizando la prueba de dureza. Explique por qué tal método proporciona mediciones cualitativas.

Sección 7-3 Características microestructurales de las fracturas en materiales metálicos

Sección 7-4 Características microestructurales de las fracturas en cerámicas, vidrios y compuestos

7-12 Explique los términos fracturas intergranular e intragranular. Utilice un esquema que muestre los granos, sus límites y una trayectoria de la grieta que sea común de las fracturas intergranular e intragranular en los materiales.

7-13 ¿Cuáles son las características microestructurales distintivas asociadas con la fractura dúctil?

7-14 ¿Cuáles son las características microestructurales distintivas asociadas con una fractura frágil en un material metálico?

7-15 Por lo general, ¿qué materiales muestran una fractura concoidal?

7-16 Describa de manera breve cómo pueden fallar los materiales compuestos reforzados con fibras.

7-17 El concreto tiene una resistencia excepcional en compresión, pero falla con bastante facilidad en tensión. Explique la causa de estos comportamientos.

7-18 ¿Qué controla la resistencia de los vidrios? ¿Qué puede hacerse para incrementar la resistencia de los vidrios de silicato?

Sección 7-5 Estadística de Weibull para analizar la resistencia a la falla

7-19 Trace un esquema de la resistencia de las cerámicas y de los metales y aleaciones como una función de la probabilidad de falla. Explique las diferencias que anticipe.

7-20 ¿Por qué la resistencia de las cerámicas varía de manera considerable con el tamaño de sus componentes?

7-21 ¿Qué parámetro indica la variabilidad de la resistencia de las cerámicas y los vidrios?

7-22 ¿Por qué las fibras de vidrio de distintas longitudes tienen resistencias diferentes?

7-23 Explique la importancia de la distribución de Weibull.

7-24* Turbochargers Are Us, una nueva empresa, lo contrata para diseñar su nuevo turbocompresor. Le explican que desean reemplazar su turbocompresor de superaleación metálica con una cerámica de alta tecnología que es mucho más ligera para la misma configuración. El nitruro de silicio puede ser una buena elección y le pide a Ceramic Turbochargers, Inc. que le suministre barras con cierto grado de Si_3N_4. Le envían 25 barras que rompe en una flexión en tres puntos, utilizando una longitud de soporte externa de 40 mm y una longitud de carga interna de 20 mm, con lo cual obtiene la información que se muestra en la siguiente tabla.

a) Calcule la resistencia a la flexión utilizando $\sigma_f = (1.5\ F\ S)/(t^2/w)$, donde F = carga, S = longitud de soporte (longitud de carga a = 40 mm y b = 20 mm en este caso), t = grosor y w = ancho y determine la resistencia media (probabilidad de 50% de falla) y la desviación estándar.

b) Trace una gráfica de Weibull que ordene la información de la resistencia más baja a la resistencia más alta. La resistencia más baja se hace $n = 1$, después $n = 2$, etc., hasta que $n = N = 25$. Utilice $F = (n - 0.5)/N$ donde n = orden de la resistencia que va de la resistencia más baja $n = 1$ a la resistencia más alta n = 25 y $N = 25$. Observe que F es la probabilidad de la falla. Grafique $\ln[1/(1 - F)]$ como una función del $\ln \sigma_f$ y utilice regresión lineal para encontrar la pendiente de la línea, la cual es m: el módulo de Weibull. Encuentre la resistencia característica (σ_0) (probabilidad de 63.2% de falla). (*Sugerencia*: La resistencia característica se calcula con facilidad fijando $\ln[1/(1 - F)] = 0$ una

Barra	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Carga (N)
1	6.02	3.99	2510
2	6.00	4.00	2615
3	5.98	3.99	2375
4	5.99	4.04	2865
5	6.00	4.05	2575
6	6.01	4.00	2605
7	6.01	4.01	2810
8	5.95	4.02	2595
9	5.99	3.97	2490
10	5.98	3.96	2650
11	6.05	3.97	2705
12	6.00	4.05	2765
13	6.02	4.00	2680
14	5.98	4.01	2725
15	6.03	3.99	2830
16	5.95	3.98	2730
17	6.04	4.03	2565
18	5.96	4.01	2650
19	5.97	4.05	2650
20	6.02	4.00	2745
21	6.01	4.00	2895
22	6.00	3.99	2525
23	6.00	3.98	2660
24	6.04	3.95	2680
25	6.02	4.05	2640

**El Dr. Raymond Cutler, de Ceramatek Inc., contribuyó con este problema.

vez que conoce la ecuación de la línea. Un programa de hoja de cálculo (como Excel) facilita en gran medida los cálculos).

7.25** Su jefe le pide que calcule el esfuerzo de diseño de una barra de níquel-aluminuro frágil que desea usar en un diseño a temperatura alta donde el componente cilíndrico se esfuerza en tensión. Usted decide probar barras del mismo diámetro y longitud como diseño en tensión para evitar la corrección del área efectiva (o volumen efectivo en este caso). Mide un esfuerzo promedio de 673 MPa y un módulo de Weibull (m) de 14.7 en las barras de níquel-aluminuro. ¿Cuál es el esfuerzo de diseño en MPa si 99.999% de las piezas que construya deben soportar este esfuerzo sin fracturarse? (*Nota*: El esfuerzo de diseño es el esfuerzo que elige como ingeniero para que el componente funcione como usted desea.)

Sección 7-6 Fatiga

Sección 7-7 Resultados de la prueba de fatiga

Sección 7-8 Aplicación de la prueba de fatiga

7-26 Realice una investigación en línea sobre el accidente del vuelo 243 de Aloha Airlines en 1988 y explique los factores que provocaron el desgarramiento y la ruptura del fuselaje principal.

7-27 Mencione cuatro medidas que pueden tomarse para incrementar la resistencia a la fatiga de una aleación metálica.

7-28 Se lleva a cabo una prueba de fatiga con 70 MPa de esfuerzo medio y 210 MPa de amplitud. Calcule el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo.

7-29 Un espécimen cilíndrico de acero para herramienta de 152.4 mm de largo y de 6.35 mm de diámetro gira como una viga en voladizo y se diseña de tal manera que nunca ocurra una falla. Suponiendo que los esfuerzos de tensión y compresión máximos son iguales, determine la carga máxima que puede aplicarse al extremo de la viga. (Vea la figura 7-18.)

7-30 Se espera que una barra de 20 mm de diámetro y 200 mm de largo de un polímero de acetal (figura 7-28) que se carga en un extremo sobreviva un millón de ciclos de carga, con esfuerzos de tensión y compresión iguales, durante su tiempo de vida. ¿Cuál es la carga máxima permisible que puede aplicarse?

7-31 Una viga de aleación con base de níquel (aleación INCONEL^{MR} 801) es recocida y expuesta a una carga cíclica de 100 N con esfuerzos mínimos y máximos iguales (figura 7-29). La viga tiene 5 mm de diámetro y 50 mm de longitud. ¿Cuánto tiempo de vida

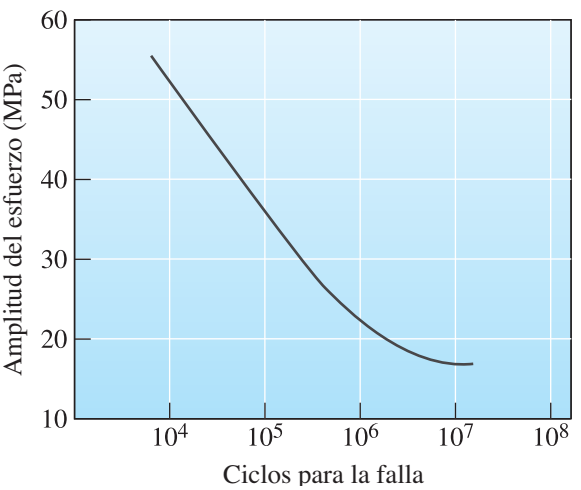


Figura 7-28 Curva de fatiga S-N de un polímero de acetal (problemas 7-30, 7-33 y 7-34).

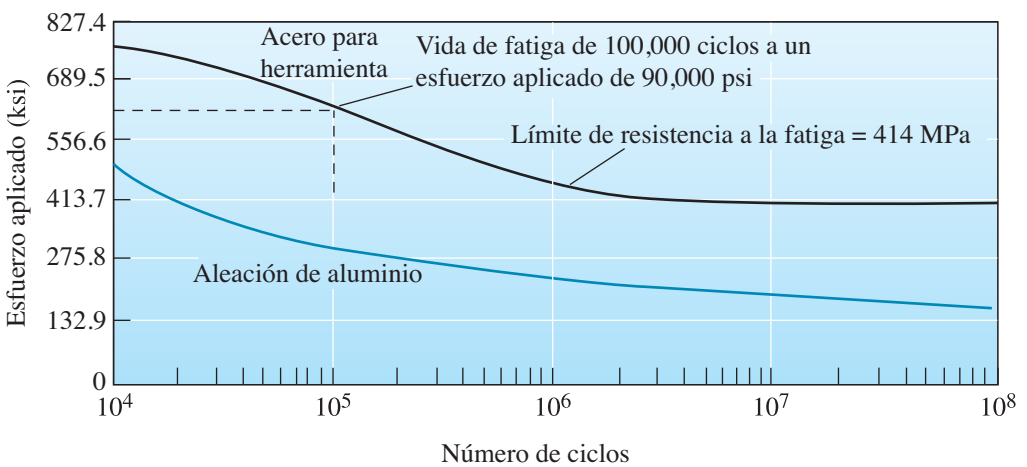


Figura 7-18 (Repetida, problema 7-29) Curvas de esfuerzo-número de ciclos para la falla (S-N) del acero para herramienta y una aleación de aluminio.

** El Dr. Raymond Cutler, de Ceramatek Inc., contribuyó con este problema.

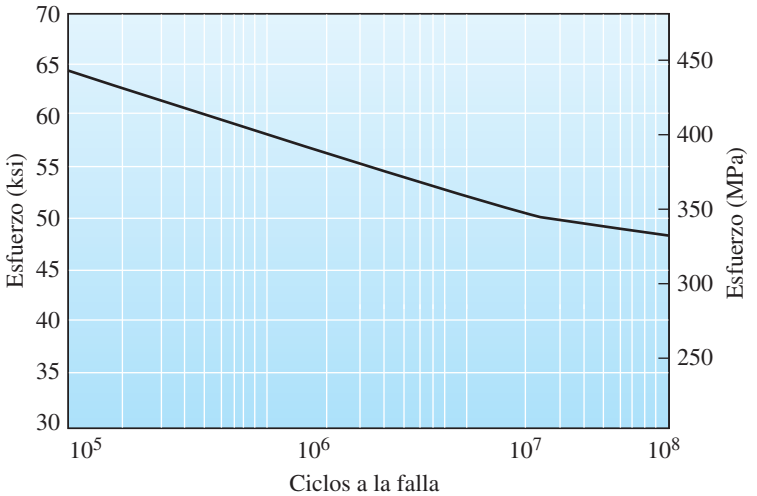


Figura 7-29 Curva de ciclos a la falla S-N de la aleación recocida INCONEL 801 del problema 7-31.

se espera que tenga la viga en número de ciclos a la falla? Si la frecuencia del ciclo es de 10 Hz, ¿cuál sería el tiempo de vida en horas?

7-32 Se ejerce una carga cíclica de 6.67 kN en el extremo de una viga de aluminio de 254 mm de largo (figura 7-18). La barra debe sobrevivir por lo menos 10^6 ciclos. ¿Cuál es el diámetro mínimo de la barra?

7-33 Una barra cilíndrica de polímero de acetal de 200 mm de largo y 15 mm de diámetro se sujeta a una carga vibracional en un extremo de la barra a una frecuencia de 500 vibraciones por minuto, con una carga de 50 N. ¿Cuántas horas sobrevivirá la pieza antes de romperse? (Vea la figura 7-28.)

7-34 Suponga que le gustaría producir una pieza a partir del polímero de acetal que se muestra en la figura 7-28 para que sobreviva un millón de ciclos en condiciones que significan esfuerzos iguales de compresión y tensión. ¿Cuál es la resistencia a la fatiga, o amplitud del esfuerzo máximo, que se requieren? ¿Cuáles son el esfuerzo máximo, el mínimo y el medio sobre la pieza durante su uso? ¿Qué efecto tendría la frecuencia de la aplicación del esfuerzo en sus respuestas? Fundamente su explicación.

7-35 El acero de alta resistencia que se muestra en la figura 7-20 se sujeta a un esfuerzo alternante a 200 revoluciones por minuto entre 600 y 200 MPa (ambos en tensión). Calcule la rapidez del crecimiento de una grieta en la superficie cuando alcanza una longitud de 0.2 mm en m/ciclo y m/s. Suponga que $f = 1.0$.

7-36 El acero de alta resistencia de la figura 7-20, que tiene una tenacidad a la fractura crítica de 80 MPa $\sqrt{\text{m}}$, se sujeta a un esfuerzo alternante que varía de −900 MPa (en compresión) a +900 MPa (en tensión). Debe sobrevivir 10^5 ciclos antes de que ocurra la falla. Suponga que $f = 1$. Calcule

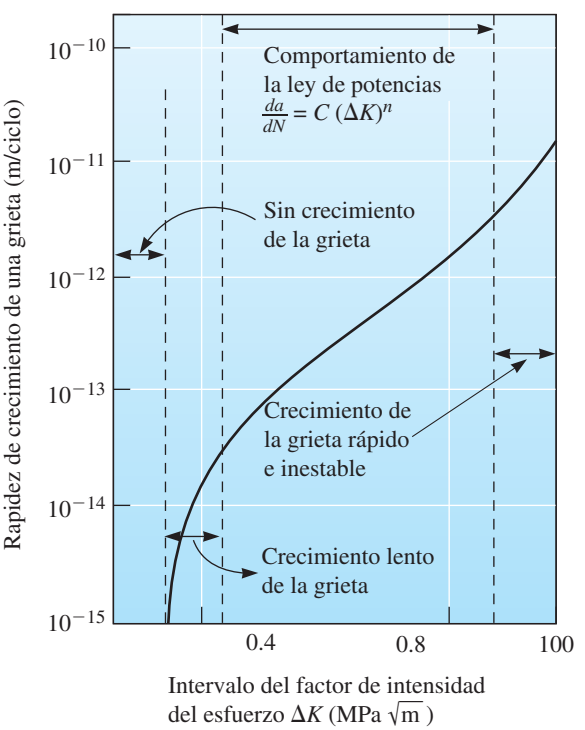


Figura 7-20 (Repetida para los problemas 7-35 y 7-36). Velocidad de crecimiento de una grieta en función del intervalo del factor de intensidad del esfuerzo de un acero de alta resistencia. Para este acero, $C = 1.62 \times 10^{-12}$ y $n = 3.2$ para las unidades mostradas.

a) el tamaño de una grieta en la superficie que se requiere para que ocurra la falla y
b) el tamaño inicial mayor de una grieta en la superficie que permitirá que esto suceda.

7-37 El fabricante de un producto que opera en ciclos repetitivos ha especificado que el producto debe retirarse del servicio cuando cualquier grieta alcance 15% de la longitud crítica de la grieta que se requiere para provocar la fractura.

Considere una grieta que inicialmente es de 0.02 mm de largo en un material con una tenacidad a la fractura de 55 MPa $\sqrt{m}$. El producto se cicla de manera continua entre esfuerzos de compresión y tensión de 300 MPa a una frecuencia constante. Suponga grietas externas en las cuales $f = 1.12$. Las constantes de los materiales de estas unidades son $n = 3.4$ y $C = 2 \times 10^{-11}$.

a) ¿Cuál es la longitud crítica de la grieta que se requiere para provocar la fractura?
b) ¿Cuántos ciclos provocarán que el producto falle?
c) Si el producto se retira del servicio como especifica el fabricante, ¿cuánto le resta de vida útil?

7-38 Un material que contiene grietas de longitud inicial de 0.010 mm soporta esfuerzos de tensión alternos de 25 y 125 MPa por 350,000 ciclos. Después, el material recibe esfuerzos de tensión y compresión alternantes de 250 MPa. ¿Cuántos ciclos con la amplitud del esfuerzo más grande puede soportar el material antes de la falla? El material tiene una tenacidad a la fractura de 25 MPa $\sqrt{m}$ y sus constantes son $n = 3.1$ y $C = 1.8 \times 10^{-10}$ en estas unidades. Suponga $f = 1.0$ en todas las grietas.

7-39 El polímero de acrílico a partir de cual se obtuvo la figura 7-30 tiene una tenacidad crítica a la fractura de 2 MPa $\sqrt{m}$. Se sujeta a un esfuerzo alternante de entre -10 y $+10$ MPa. Calcule la velocidad de crecimiento de una grieta en la superficie cuando alcanza una longitud de 5×10^{-6} m si $f = 1.0$.

7-40 Calcule las constantes C y n de la ecuación 7-18 de la velocidad de crecimiento de una grieta de un polímero de acrílico. (Vea la figura 7-30.)

7-41 Al polímero de acrílico a partir de cual se obtuvo la figura 7-30 se lo somete a un esfuerzo alternante entre 15 y 0 MPa. Las grietas superficiales más grandes detectadas por una prueba no destructiva son de 0.001 mm de longitud. Si la tenacidad crítica a la fractura del polímero es de 2 MPa $\sqrt{m}$, calcule el número de ciclos que se requieren antes de que ocurra la falla. Sea $f = 1.0$. (*Sugerencia*: Utilice los resultados del problema 7-40.)

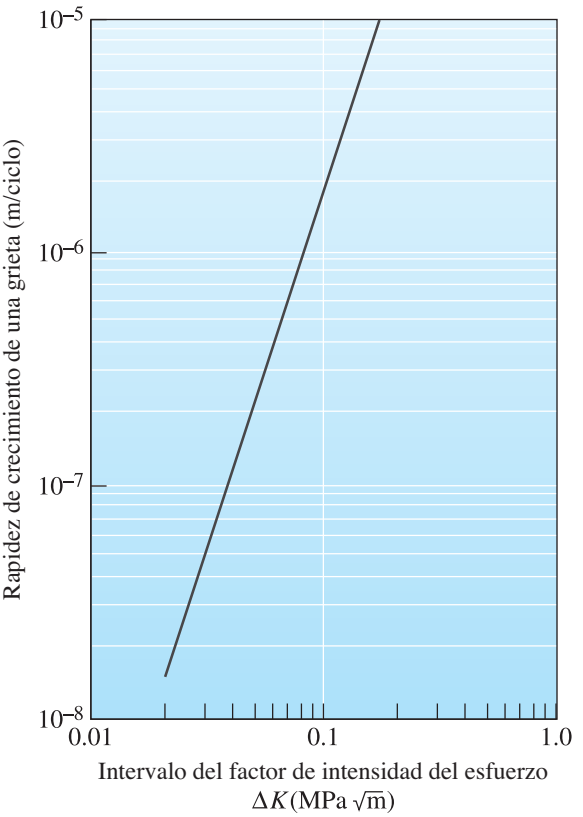


Figura 7-30 Rapidez de crecimiento de una grieta en un polímero de acrílico (para los problemas 7-39, 7-40 y 7-41).

7-42 Explique cómo ocurre la falla por fatiga incluso si el material no muestra niveles de esfuerzo total mayores que la resistencia a la fluencia.

7-43 Verifique que la integración de $da/dN = C(\Delta K)^n$ dará la ecuación 7-20.

7-44 ¿Qué es el granallado? ¿Cuál es el propósito del uso de este proceso?

Sección 7-9 Termofluencia, ruptura por esfuerzo y corrosión bajo esfuerzo

Sección 7-10 Evaluación del comportamiento de la termofluencia

Sección 7-11 Uso de la información de la termofluencia

7-45 ¿Por qué el calentamiento acelera la termofluencia?

7-46 Un juguete de un niño quedó en el fondo de una alberca por varias semanas. Cuando se lo sacó del agua, falló después de sólo unos cientos de ciclos de carga y descarga, aun cuando debió ser capaz de soportar miles de ciclos. Especule acerca de las razones por las cuales el juguete falló antes de lo esperado.

7-47 Defina el término "termofluencia" y diferéncielo de la relajación del esfuerzo.

7-48 ¿Qué significan los términos “ruptura por esfuerzo” y “corrosión bajo esfuerzo”?

7-49 ¿Cuál es la diferencia entre la falla de un material por termofluencia y la falla por ruptura por esfuerzo?

7-50 Estime una aproximación de la temperatura en la que la deformación por termofluencia se convierte en un aspecto importante de cada uno de los siguientes metales: estaño, molibdeno, hierro, oro, zinc y cromo.

7-51 La energía de activación de la autodifusión en el cobre es de 206.3 kJ/mol. Un espécimen de cobre fluye a 0.002 mm/mm/h cuando se le aplica un esfuerzo de 103.4 MPa a 600°C. Si la velocidad de termofluencia del cobre depende de la autodifusión, determine la rapidez de la termofluencia si la temperatura es de 800°C.

7-52 Cuando se aplica un esfuerzo de 137.9 MPa a un material calentado a 900°C ocurre la ruptura luego de 25,000 h. Si la energía de activación de la ruptura es de 146.4 kJ/mol, determine el tiempo de ruptura si la temperatura se reduce a 800°C.

7-53 La siguiente información se obtuvo a partir de una prueba de termofluencia de una pieza que tiene una longitud calibrada de 50.8 mm y un diámetro inicial de 15.24 mm. El esfuerzo inicial aplicado al material es de 68.95 MPa. El diámetro del espécimen a la fractura es de 13.208 mm.

Longitud entre las marcas calibradas (mm)	Tiempo (h)
50.902	0
51.054	100
51.308	200
51.562	400
51.943	1000
52.705	2000
54.229	4000
55.702	6000
56.642	7000
58.42	8000 (fracture)

Determine

a) la carga aplicada al espécimen durante la prueba;

b) la longitud aproximada del tiempo durante el cual ocurre la termofluencia lineal;

c) la rapidez de termofluencia en mm/mm/g y en porcentaje h, y

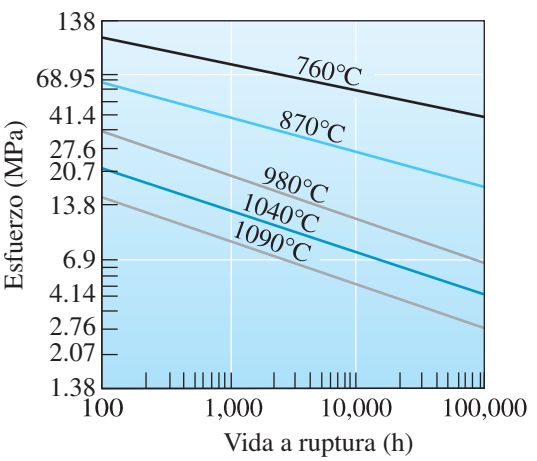
d) el esfuerzo verdadero que actúa sobre el espécimen en el tiempo de ruptura.

7-54 Un acero inoxidable se mantiene a 705°C bajo diferentes cargas. Se obtiene la siguiente información:

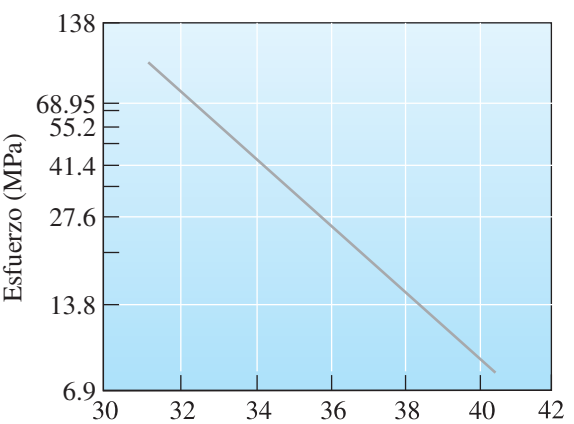
Esfuerzo aplicado (MPa)	Tiempo de ruptura (h)	Velocidad de termofluencia (%/h)
106.9	1200	0.022
128.2	710	0.068
147.5	300	0.201
160.0	110	0.332

Determine los exponentes n y m de las ecuaciones 7-22 y 7-23 que describen la dependencia de la velocidad de termofluencia y el tiempo de ruptura del esfuerzo aplicado.

7-55 Utilizando la información de la figura 7-26 correspondiente a una aleación de hierro-cromo-níquel, determine la energía de activación Q_r y la constante m de la ruptura en el intervalo de temperatura de 980 a 1,090°C.



a)



b)

Figura 7-26 (Repetida, problemas 7-55 a 7-59)

Resultados de una serie de pruebas de termofluencia. *a*) Curvas de ruptura por esfuerzo de una aleación de hierro-cromo-níquel y *b*) parámetro de Larson-Miller del hierro colado dúctil.

7-56 A una barra de 25.4 mm de diámetro de una aleación de hierro-cromo-níquel se le aplica una carga de 11.12 kN. ¿Cuántos días sobrevivirá la barra sin romperse a 980°C? [Vea la figura 7-26*a*).]

7-57 Una barra de 5 × 20 mm de una aleación de hierro-cromo-níquel opera a 1,040°C por 10 años sin romperse. ¿Cuál es la carga máxima que puede aplicarse? [Vea la figura 7-26*a*).]

7-58 Una aleación de hierro-cromo-níquel debe soportar una carga de 6.67kN a 760°C por 6 años. Calcule el diámetro mínimo de la barra. [Vea la figura 7-26*a*).]

7-59 Una barra de 30.5 mm de diámetro de una aleación de hierro-cromo-níquel debe operar por 5 años bajo una carga de 17.8 kN. ¿Cuál es la temperatura máxima de operación? [Vea la figura 7-26*a*).]

7-60 Se diseña un componente con una aleación con base de níquel (INCONEL 601) para soportar un esfuerzo de servicio de 27.58 MPa a una temperatura de 925°C. Determine la temperatura a la que se debe operar el componente para duplicar su expectativa de vida si el esfuerzo aplicado se mantiene constante. Vea la figura 7-31.

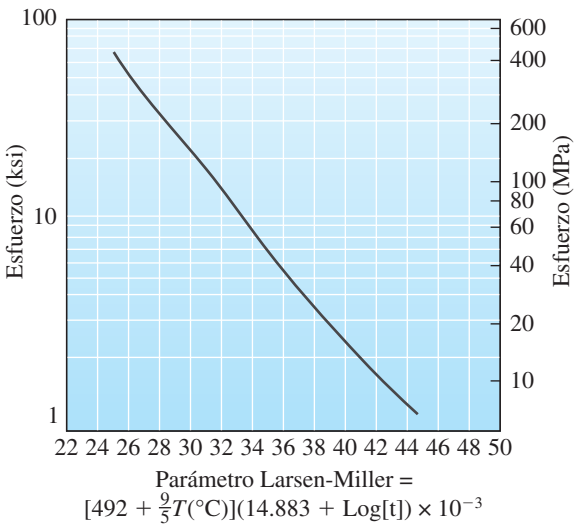


Figura 7-31 Parámetro Larsen-Miller de la aleación INCONEL 601 (problemas 7-60 y 7-61). Las unidades de la temperatura T son °C y las del tiempo t son horas.

7-61 ¿Cuál es el esfuerzo máximo que podrá soportar la pieza con base de níquel de la figura 7-31 a una temperatura de 300°C y un tiempo de vida de tres años?

7-62 Una barra de hierro colado dúctil de 25 mm × 50 mm debe operar durante 9 años a 650°C. ¿Cuál es la carga máxima que puede aplicarse? [Vea la figura 7-26*b*).]

7-63 Una barra de hierro fundido dúctil debe operar a un esfuerzo de 41.4 MPa por 1 año. ¿Cuál es la temperatura máxima permisible? [Vea la figura 7-26*b*).]

Problemas de diseño

7-64 Se diseña un gancho (figura 7-32) para levantar contenedores de minerales en una mina usando un material no ferroso (no basado en hierro). (Se usa un material no ferroso debido a que el hierro y el acero podrían provocar una chispa que encendería los gases explosivos en la mina.) El gancho debe soportar una carga de 111.2 kN y debe utilizarse un factor de seguridad de 2. Se ha determinado que la sección transversal designada "¿?" es el área más crítica; el resto del dispositivo ya está bien diseñado. Determine los requisitos para diseñar este dispositivo y, con base en la información de las propiedades mecánicas dada en los capítulos 14 y 15 y en los precios de los metales/aleaciones obtenidos a partir de fuentes como sus periódicos locales, el sitio web del London Metal Exchange o de *The Wall Street Journal*, diseñe el gancho y seleccione un material económico para fabricarlo.

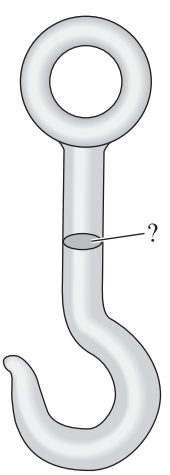


Figura 7-32 Esquema de un gancho (problema 7-64).

7-65 Una barra de soporte de un tren de aterrizaje de un avión privado se sujeta a una carga de tensión durante el aterrizaje. Se predice que las cargas son tan altas como 178 kN. Debido a que la barra es crucial y su falla podría provocar pérdida de vidas, la barra debe diseñarse con un factor de seguridad de 4 (es decir, se diseña de tal manera que pueda soportar cargas cuatro veces mayores que las esperadas). La operación

del sistema también produce cargas que pueden inducir grietas en la barra. El equipo de prueba no destructiva puede detectar cualquier grieta mayor de 0.51 mm de profundidad. Con base en los materiales dados en la sección 7-1, diseñe la barra de soporte y elija el material para fabricarla. Explique su respuesta.

7-66 Se diseña una flecha giratoria ligera para una bomba sobre el plano aeroespacial nacional, a fin de que soporte durante el servicio una carga cíclica de 66.7 kN. El esfuerzo máximo es el mismo en tensión y compresión. Abajo se muestran los límites de resistencia a la fatiga o resistencias a la fatiga de varios materiales elegibles. Diseñe la flecha, incluya un material apropiado, y explique su solución.

Material	Límite de resistencia a la fatiga/ resistencia a la fatiga (MPa)
Aleación de Al-Mn	110
Aleación de Al-Mg-Zn	225
Aleación de Cu-Be	295
Aleación de Mg-Mn	80
Aleación de Be	180
Aleación de tungsteno	320

7-67 Una barra de hierro colado dúctil tiene que soportar una carga de 178 kN en un horno de tratamiento térmico que se emplea para hacer maleable el hierro colado. La barra se localiza en un sitio que está expuesto de manera continua a 500°C. Diseñe la barra de tal manera que pueda operar por lo menos 10 años sin fallar.

Problemas Knovel[MR]

K7-1 Una flecha hueca de acero 4340 AISI tiene un diámetro externo D_e de 102 mm y un diámetro interno D_i de 63.5 mm. La flecha gira a 46 rpm por una hora durante cada día. Está soportada por dos cojinetes y cargada en medio con una carga W de 24.47 kN. La distancia entre los cojinetes L es de 1.98 m. El esfuerzo de tensión máximo debido a la flexión de este tipo de carga cíclica se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_m = \frac{8WLD_o}{\pi(D_o^4 - D_i^4)}$$

¿Cuál es la razón de los esfuerzos de este tipo de carga cíclica? ¿Esta flecha puede durar un año suponiendo un factor de seguridad de 2?

En aplicaciones, como la formación del bastidor de automóviles, los metales y las aleaciones se deforman. Las propiedades mecánicas cambian durante el proceso, debido al endurecimiento por deformación. El comportamiento del endurecimiento por deformación de los aceros que se usan para fabricar bastidores influye en la capacidad para moldear formas aerodinámicas. El comportamiento del endurecimiento por deformación también es importante para mejorar la resistencia a los impactos de los vehículos. (*Cortesía de Digital Vision/Getty Images*)

CAPÍTULO

8

Endurecimiento por deformación y recocido

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Por qué al doblar un alambre de cobre éste adquiere más resistencia?*
- *¿Cómo se fabrican las latas de aluminio para bebidas?*
- *¿Por qué los termoplásticos son más resistentes a medida que se deforman?*
- *¿Cuál es la diferencia entre los vidrios de seguridad recocidos, templados y laminados?*
- *¿Por qué la resistencia del material metálico alrededor de una soldadura podría ser menor que la del material que lo rodea?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Cuantificar el endurecimiento por deformación de un metal y explicar por qué puede incrementar de forma significativa la fuerza necesaria para deformarlo.
- Cuantificar la sensibilidad a la velocidad de deformación de un metal y explicar por qué puede influir en la fuerza necesaria para deformarlo.
- Predecir la forma en que las propiedades de un material policristalino trabajado en frío cambiarán por recocimiento (recubrimiento, recristalización, crecimiento de grano) y deformación y cómo ello afectará su comportamiento mecánico.
- Diseñar procesos para producir hojas de metal con las dimensiones y propiedades mecánicas deseadas mediante la combinación de tratamientos de trabajo y recocimiento.

En este capítulo se aprenderá cómo la resistencia de los metales y aleaciones es afectada por el procesamiento mecánico y los tratamientos térmicos. En el capítulo 4 se aprendió acerca de las distintas técnicas que pueden endurecer los metales y aleaciones (por ejemplo, el incremento de la densidad de las dislocaciones, la disminución del tamaño de los granos, la aleación, etc.). En este capítulo se explica cómo incrementar la resistencia de los metales y aleaciones utilizando el trabajo en frío, un proceso por medio del cual un material metálico se deforma y endurece de forma simultánea. También se verá cómo puede utilizarse el trabajo en caliente para moldear metales y aleaciones por medio de la deformación a altas

temperaturas sin endurecerlos. Además, se aprenderá cómo puede utilizarse el tratamiento térmico del recocido para incrementar la ductilidad y contrarrestar el incremento de la dureza provocado por el trabajo en frío. Los temas que se explican en este capítulo se aplican en particular a metales y aleaciones.

¿Qué hay acerca de los polímeros, vidrios y cerámicas? ¿También se endurecen por deformación? Se mostrará que, con frecuencia, la deformación de los polímeros termoplásticos produce un efecto de endurecimiento, pero el mecanismo del endurecimiento por deformación es completamente distinto cuando se trata de polímeros o de materiales metálicos. La resistencia de la mayoría de los materiales quebradizos, como las cerámicas y los vidrios, depende de las imperfecciones y de la distribución de los tamaños de éstas (capítulo 7). Por lo tanto, los vidrios inorgánicos y las cerámicas no responden bien al endurecimiento por deformación. Es decir, se deben considerar estrategias diferentes para endurecer estos materiales. En este contexto se explicarán los principios del templado y el recocido de vidrios.

Se comienza con la explicación del endurecimiento por deformación en los materiales metálicos en el contexto de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria.

8-1 Relación del trabajo en frío con la curva de esfuerzo-deformación

En la figura 8-1*a*) se muestra una curva de esfuerzo-deformación unitaria de un material metálico dúctil. Si se aplica un esfuerzo S_1 que sea mayor que la resistencia a la fluencia S_y, se provoca una torcedura o deformación permanente. Cuando se elimina el esfuerzo, permanece una deformación e_1. Si se prepara una muestra para la prueba de tensión del material metálico que ha sido esforzado previamente a S_1 y se vuelve a probar ese material, se obtiene la curva de esfuerzo-deformación que se muestra en la figura 8-1*b*). Este nuevo espécimen de prueba comenzaría a deformarse o a fluir de manera plástica a un nivel de esfuerzo S_1. Se define el *esfuerzo de flujo* como el esfuerzo que se requiere para iniciar el flujo plástico en un material deformado con anterioridad. Por lo tanto, S_1 es ahora el esfuerzo de flujo del material. Si se continúa aplicando un esfuerzo hasta que se alcance S_2, se libera el esfuerzo y de nuevo se vuelve a probar el material metálico, el nuevo esfuerzo de flujo es S_2. Cada vez que se aplica un esfuerzo mayor, el esfuerzo de flujo y la resistencia a la tensión aumentan y la ductilidad disminuye. Con el tiempo se endurece el material metálico hasta que el esfuerzo de flujo y las resistencias a la tensión y a la ruptura son iguales y no existe ductilidad [figura 8-1*c*)]. En este punto, el material metálico no puede deformarse más de manera plástica. Las figuras 8-1*d*) y *e*) están relacionadas con la recuperación elástica, un concepto que se explica más adelante en esta sección.

Cuando se aplica un esfuerzo que supera la resistencia a la fluencia original del material metálico, éste se **endurece por deformación** o **trabajo en frío**, a la vez que, de manera simultánea, se deforma. Esta es la base de varias técnicas de fabricación, como el trefilado. La figura 8-2 ilustra varios procesos de fabricación que recurren a procesos de trabajo en frío y trabajo en caliente. Más adelante en este capítulo se explicará la diferencia entre **trabajo en caliente** y **trabajo en frío**. Se utilizan muchas técnicas de **procesamiento de deformación** para darle forma y endurecer de manera simultánea un material por medio del trabajo en frío (figura 8-2). Por ejemplo, se utiliza el **laminado** para producir placas, hojas o láminas metálicas. El **forjado** deforma el metal en una cavidad de un molde para producir formas relativamente complejas como cigüeñales o bielas de automóviles. Cuando se emplea el **trefilado**, se jala de una barra metálica a través de un dado para producir un alambre o fibra. En la **extrusión** se empuja un material a través de un dado para formar productos de secciones transversales uniformes, entre ellos barras, tubos o molduras de aluminio para puertas o ventanas. Se utiliza el *embutido profundo* para formar el cuerpo de latas de bebidas de aluminio. El *estiramiento* y el *doblez* se utilizan para moldear hojas del material. Por lo tanto, el trabajo en frío es una manera eficaz de moldear materiales metálicos mientras, de manera simultánea, se incrementa su resistencia. El inconveniente de este proceso es la pérdida de ductilidad. Si toma un alambre de metal y lo dobla de manera reiterada se endurecerá y con el tiempo se romperá, a causa del endurecimiento por deformación. Este proceso se utiliza para fabricar varios productos, especialmente aquellos que no serán expuestos a temperaturas muy altas. Por ejemplo, una lata de aluminio para bebidas puede disminuir

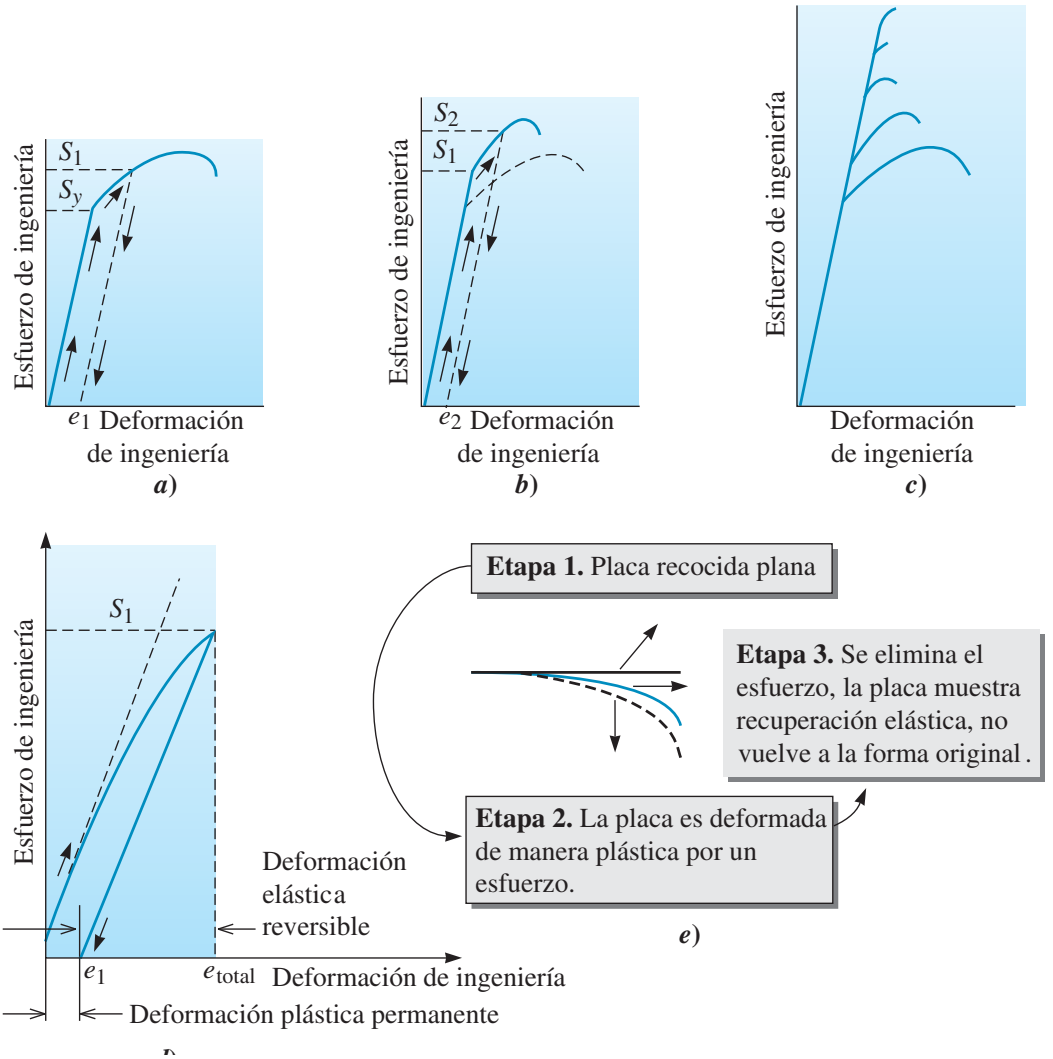


Figura 8-1 Desarrollo del endurecimiento por deformación a partir del diagrama de esfuerzo-deformación ingenieriles. *a*) Un espécimen se esfuerza más allá de la resistencia a la fluencia S_y antes de que se elimine el esfuerzo. *b*) El espécimen tiene ahora mayores resistencias a la fluencia y la tensión, pero menor ductilidad. *c*) Cuando se repite el procedimiento, la resistencia continúa en aumento y la ductilidad sigue disminuyendo hasta que la aleación adquiere una naturaleza muy quebradiza. *d*) La deformación total es la suma de las componentes elástica y plástica. Cuando se elimina el esfuerzo, se recupera la deformación elástica, no así la deformación plástica. *e*) Ilustración de la recuperación elástica. (*Basada en* Engineering Materials I, *segunda edición, M. F. Ashby y D. R. H. Jones, Elsevier, 1996*.)

casi 70% su resistencia como resultado del endurecimiento por deformación que ocurre durante su fabricación. Una parte de la resistencia de las latas de aluminio también proviene de los elementos de aleación (por ejemplo, Mg) adicionados. Observe que varios de los procesos, como el laminado, pueden llevarse a cabo utilizando trabajo en frío y en caliente. Los pros y contras de utilizar cada uno se explicarán más adelante en este capítulo.

Exponente del endurecimiento por deformación (n)

La respuesta de un material metálico al trabajo en frío está dada por el exponente del **endurecimiento por deformación** n. La relación entre el esfuerzo verdadero σ, la deformación verdadera ε y el exponente del

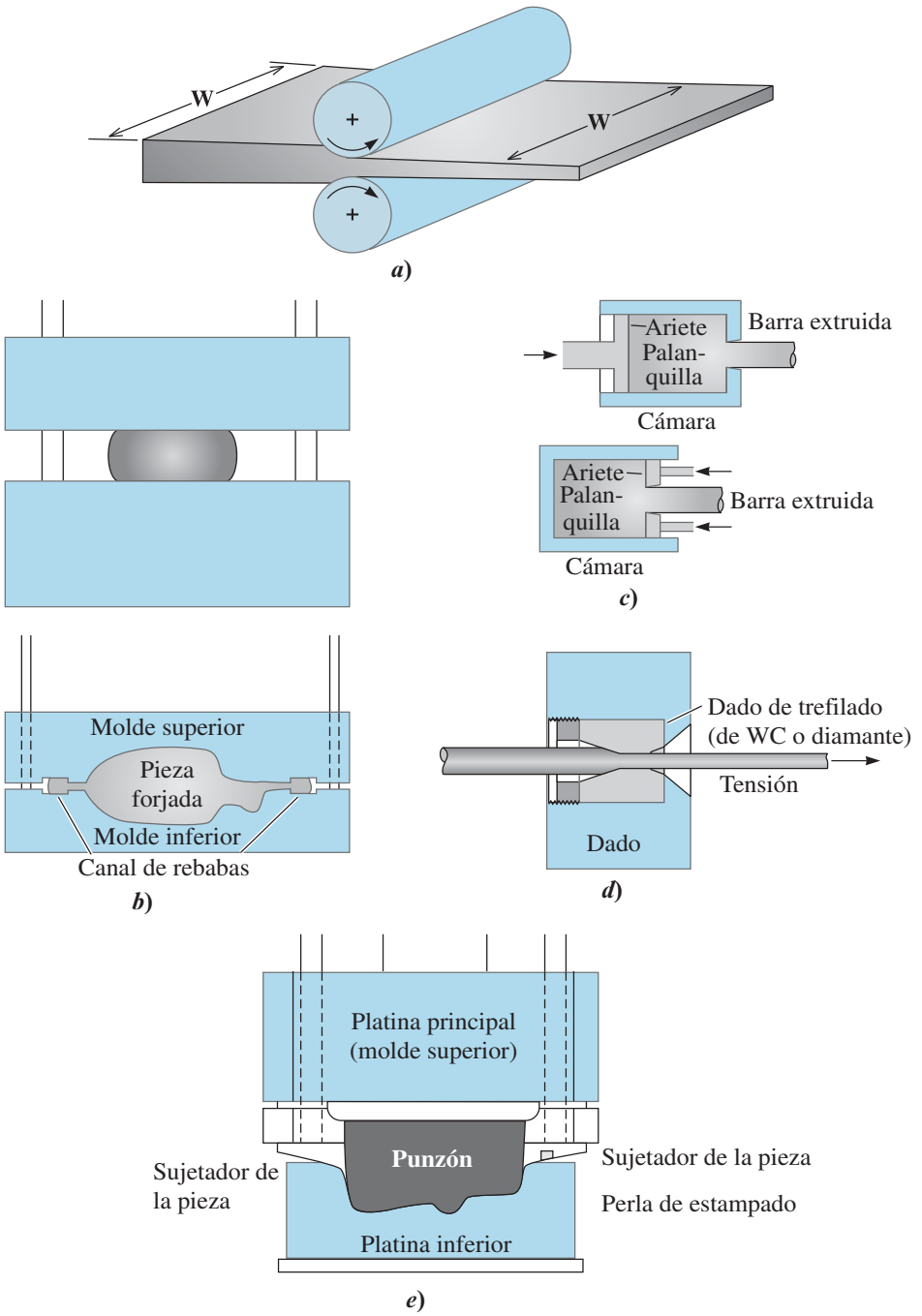


Figura 8-2 Procesos de fabricación que emplean el trabajo en frío al igual que el trabajo en caliente. Métodos de metalistería comunes. *a*) Laminado o rolado. *b*) Forjado (con molde abierto y cerrado). *c*) Extrusión (directa e indirecta). *d*) Trefilado. *e*) Estampado. (*Basada en* Mechanical Behavior of Materials, *de M. A. Meyers y K. K. Chawla, Cambridge University Press.*)

endurecimiento por deformación n está gobernada por el llamado comportamiento de la ley de potencias con base en

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{8-1}$$

La constante K (conocida como coeficiente de resistencia) es igual al esfuerzo cuando $\varepsilon = 1$. Cuando se obtiene el logaritmo en ambos lados de la ecuación 8-1, se tiene que

$$\ln \sigma = \ln K + n \ln \varepsilon \tag{8-2}$$

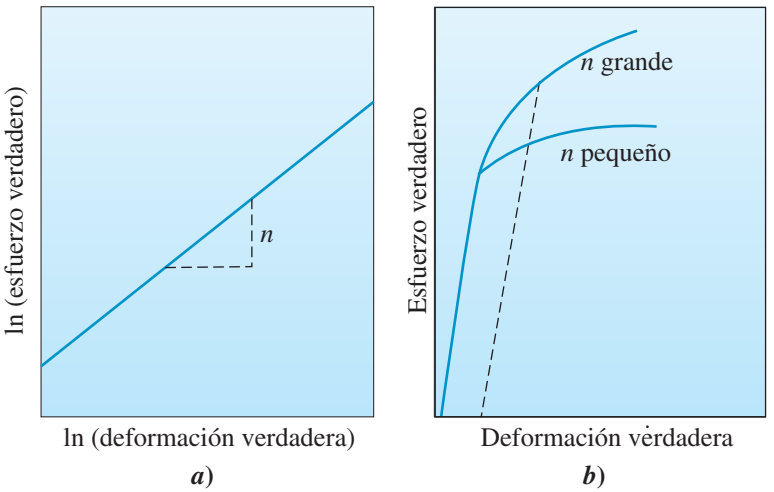


Figura 8-3 *a*) Parte plástica de una curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera de un metal. Se grafican los logaritmos naturales del esfuerzo y la deformación. El exponente del endurecimiento por deformación es la pendiente de la curva. *b*) La curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera de metales con exponentes del endurecimiento por deformación grandes y pequeños. Se obtienen grados de endurecimiento mayores para una deformación dada del metal con *n* grande.

En la figura 8-3*a*) se muestran los logaritmos naturales del esfuerzo y deformación verdaderos y el exponente del endurecimiento por deformación como pendiente de la porción plástica. Se obtienen grados de endurecimiento mayores para una deformación dada a medida que aumenta *n*, como se muestra en la figura 8-3*b*). Además, la estricción que se experimenta en una prueba de tensión inicia cuando la deformación verdadera ε es aproximadamente igual al exponente del endurecimiento por deformación *n*.

En el caso de los metales, el endurecimiento por deformación es resultado de la interacción y multiplicación de las dislocaciones. El exponente del endurecimiento por deformación es relativamente bajo en los metales CH, pero es mayor en los CCCu, y en particular en los metales CCCa (tabla 8-1). Los metales con un exponente de endurecimiento por deformación bajo responden de manera deficiente al trabajo en frío. Si se toma un alambre de cobre y se dobla, el alambre doblado es más resistente como resultado del endurecimiento por deformación.

Sensibilidad a la velocidad de deformación (*m*)

La **sensibilidad a la velocidad de deformación** (*m*) del esfuerzo se define como

$$m = \left[\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\varepsilon})}\right] \tag{8-3}$$

Tabla 8-1 Exponentes del endurecimiento por deformación y coeficientes de resistencia de metales y aleaciones comunes

Metal	Estructura cristalina	*n*	K (MPa)
Titanio	HCP	0.05	1206.6
Acero aleado recocido	BCC	0.15	641.2
Acero al medio carbono templado y revenido	BCC	0.10	1572
Molibdeno	BCC	0.13	724
Cobre	FCC	0.54	317.2
Cu-30% Zn	FCC	0.50	896.3
Acero inoxidable austenítico	FCC	0.52	1517

Basado en G. Dieter, Mechanical Metallurgy, *McGraw-Hill, 1961 y otras fuentes*

Ésta describe cómo cambia el esfuerzo de flujo con la rapidez (velocidad) de deformación $\dot{\varepsilon}$. Por lo general, la sensibilidad de la velocidad de deformación de los metales cristalinos es menor de 0.1, pero aumenta con la temperatura. Como ya se mencionó, el comportamiento mecánico de las hojas de acero bajo velocidades de deformación altas no sólo es importante para el moldeo, sino también para conocer qué tan bien se desempeñará el acero bajo una carga de alto impacto. La resistencia al impacto de las hojas de acero es un aspecto importante para la industria automotriz. Los aceros que se endurecen con rapidez bajo la carga de impacto son útiles para absorber la energía mecánica. Un valor positivo de m implica que el material resistirá la estricción (capítulo 6).

Recuperación elástica

Otra cuestión que se debe observar es que cuando se deforma un material metálico utilizando un esfuerzo mayor que su resistencia a la fluencia a un nivel mayor [S_1 en la figura 8-1*d*)], la deformación correspondiente que existe al esfuerzo S_1 se obtiene bajando una línea perpendicular al eje horizontal (punto e_{total}). Se recupera una deformación igual a ($e_{\text{total}} - e_1$) dado que es elástico por naturaleza. A la *deformación elástica* que se recupera después de que un material se ha deformado de manera *plástica* se le conoce como *recuperación elástica* [figura 8-1*e*)]. La recuperación elástica es extremadamente importante para formar los paneles de la carrocería de los automóviles a partir de hojas de acero, junto con otras muchas aplicaciones. Este efecto también se observa en el tratamiento de materiales poliméricos procesados, por ejemplo, por extrusión.

Efecto Bauschinger

Considere un material que ha sufrido una deformación plástica a la tensión. Después, considere por separado dos muestras (*A* y *B*) de este material. La muestra de prueba *A* en tensión y la muestra *B* bajo compresión. Se observa que en el caso del material deformado, el esfuerzo de flujo a la tensión ($\sigma_{\text{flujo, tensión}}$) de la muestra *A* es mayor que la resistencia a la fluencia de compresión ($\sigma_{\text{flujo, compresión}}$) de la muestra *B*. A este efecto, al hecho de que la resistencia en compresión de un material sujeto a tensión se reduzca se le conoce como **efecto Bauschinger**. Observe que se compara la resistencia a la fluencia de un material bajo compresión y tensión después de que el material ha sufrido una deformación plástica bajo un esfuerzo de tensión. El efecto Bauschinger también se observa en la inversión de esfuerzos. Considere una muestra deformada bajo compresión. Se pueden evaluar dos muestras por separado, *C* y *D*. La muestra que sufre un *esfuerzo de compresión* (*C*) muestra un esfuerzo de flujo mayor que la muestra *D* sujeta a un esfuerzo a la tensión. El efecto Bauschinger desempeña una función importante en el procesamiento mecánico de los aceros y otras aleaciones.

8-2 Mecanismos del endurecimiento por deformación

Si se incrementa el número de dislocaciones se obtiene un endurecimiento durante la deformación de un material metálico. Antes de la deformación, la densidad de las dislocaciones es alrededor de 10^6 cm de líneas de dislocación por centímetro cúbico del metal, esto es, una concentración relativamente pequeña de las dislocaciones.

Cuando se aplica un esfuerzo mayor que la resistencia a la fluencia, las dislocaciones comienzan a deslizarse (ley de Schmid, capítulo 4). Con el tiempo, una dislocación que se mueve sobre su plano de deslizamiento encuentra obstáculos que fijan la línea de dislocaciones. A medida que se continúa aplicando el esfuerzo, la dislocación intenta moverse curvándose en el centro. La dislocación puede moverse tan lejos que se produce un bucle (figura 8-4). Cuando el bucle de la dislocación por fin se toca a sí mismo, se crea una nueva dislocación. La dislocación original sigue fija y puede crear bucles de dislocación adicionales. A este mecanismo para generar dislocaciones se le llama **fuente de Frank-Read**. La figura 8-4*e*) muestra una micrografía electrónica de una fuente de Frank-Read.

La densidad de las dislocaciones puede aumentar a alrededor de 10^{10} m de líneas de dislocación por centímetro cúbico del metal durante el endurecimiento por deformación. Como se explicó en el capítulo 4, el movimiento de las dislocaciones es el mecanismo que permite la fluencia plástica que

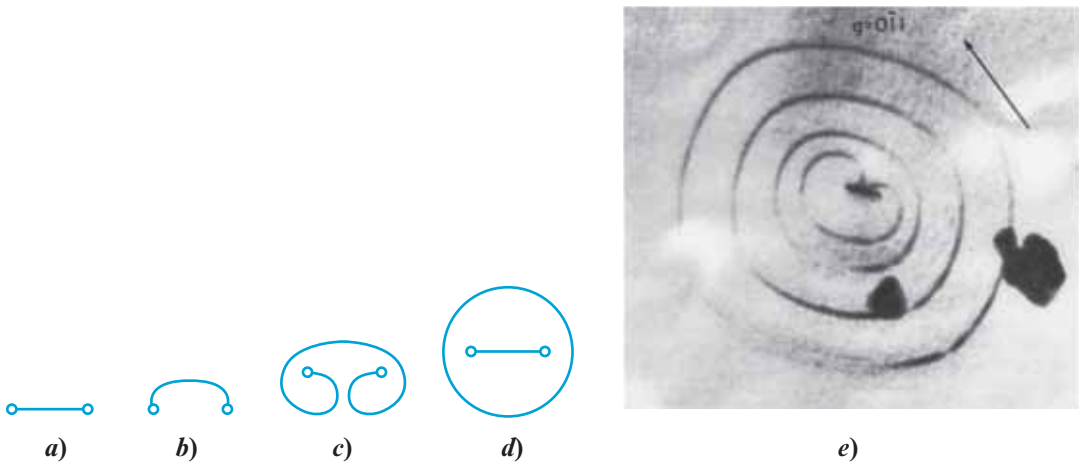


Figura 8-4 La fuente de Frank-Read puede generar dislocaciones. *a*) Una dislocación está fija en sus extremos por los defectos de red. *b*) A medida que la dislocación continúa moviéndose, la dislocación se arquea, y *c*) con el tiempo se flexiona de regreso sobre sí misma. *d*) Por último se forma un ciclo de dislocación y se crea una nueva dislocación. *e*) Micrografía electrónica de una fuente de Frank-Read (33,000 ×). (*Springer*, Metallurgical Transactions A, *vol.u 6, núm. 4, pp. 921-926, abril de 1975 "Climb sources inß'-NiAl", de G. W. Marshall, J. O. Brittain, n*úmeros *de figura(s), Derechos reservados © 1975, American Society for Metals, The Melallurgical Society of AIME. Con autorización de Springer Science y Business Media*.)

ocurre en los materiales metálicos; sin embargo, cuando existen demasiadas dislocaciones, interfieren con sus propios movimientos. Una analogía de este fenómeno es que cuando hay demasiadas personas en una habitación es difícil para ellas moverse de un lado a otro. El resultado es un incremento de la resistencia, pero una reducción de la ductilidad de los materiales metálicos que han experimentado el endurecimiento por trabajo.

Las cerámicas contienen dislocaciones e incluso pueden endurecerse por deformación en un grado pequeño; sin embargo, por lo general las dislocaciones en las cerámicas no son muy móviles. Las cerámicas policristalinas también contienen porosidad. Como resultado, las cerámicas se comportan como materiales frágiles y no es posible una deformación y un endurecimiento significativos por trabajo en frío. De modo similar, los materiales enlazados de manera covalente, como el silicio (Si), son tan frágiles como para endurecerse por trabajo de manera apreciable. Los vidrios son amorfos y no contienen dislocaciones, y por lo tanto no pueden endurecerse por deformación.

Los **termoplásticos,** polímeros como el polietileno, el poliestireno y el nailon, son materiales conformados por moléculas organizadas en cadenas largas parecidas al espagueti. Los termoplásticos se endurecen cuando se deforman. Sin embargo, este *no* es un endurecimiento por deformación debido a la multiplicación de las dislocaciones, sino que involucra la alineación y posiblemente la cristalización localizada de las moléculas largas parecidas a cadenas. Cuando se le aplica a los polímeros termoplásticos como el polietileno un esfuerzo mayor que la resistencia a la fluencia, se rompen los enlaces de van der Waals (capítulo 2) entre las moléculas que conforman las distintas cadenas. Las cadenas se endurecen y se alinean en la dirección del esfuerzo aplicado (figura 8-5). La resistencia del polímero, en particular en la dirección del esfuerzo aplicado, aumenta como resultado de la alineación de las cadenas poliméricas en la dirección del esfuerzo aplicado. Este incremento de la resistencia se observa en la curva de esfuerzo-deformación de los termoplásticos comunes. Muchas técnicas que se utilizan para procesar polímeros son similares a las que se emplean para fabricar materiales metálicos. La extrusión, por ejemplo, es la técnica de procesamiento de polímeros que más se utiliza. Aunque muchas de estas técnicas comparten similitudes conceptuales, existen diferencias importantes entre los mecanismos por medio de los cuales se endurecen los polímeros durante su procesamiento.

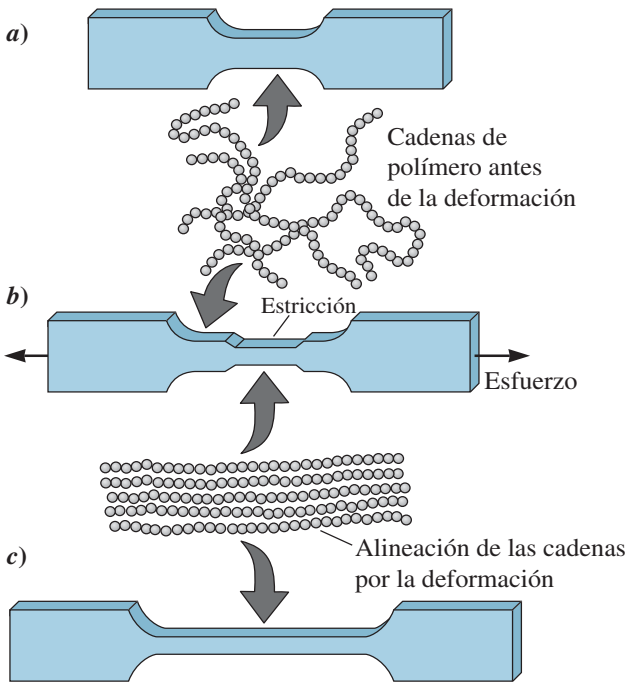


Figura 8-5 En una barra de tensión de polímero termoplástico no deformado, *a*) las cadenas de polímero están orientadas de manera aleatoria. *b*) Cuando se aplica un esfuerzo, se desarrolla una estricción a medida que las cadenas se alinean de manera local. *c*) La estricción continúa su crecimiento hasta que las cadenas se alinean en toda la longitud calibrada. Aumenta la resistencia del polímero.

8-3 Propiedades frente al porcentaje de trabajo en frío

Cuando se controla la cantidad de deformación plástica, también se controla el endurecimiento por deformación. Por lo general se mide la cantidad de deformación a través de la definición del porcentaje de trabajo en frío:

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0}\right] \times 100 \tag{8-4}$$

donde A_0 es el área original de la sección transversal del metal y A_f el área final de la sección transversal después de la deformación. En el caso del laminado en frío se utiliza el porcentaje de la reducción del grosor como la medida del trabajo en frío con base en

$$\text{Porcentaje de la reducción en el grosor} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0}\right] \times 100 \tag{8-5}$$

donde t_0 es el grosor inicial de la hoja y t_f el grosor final.

En la figura 8-6 se muestra el efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas de cobre comercialmente puro. A medida que aumenta el trabajo en frío, las resistencias a la fluencia y

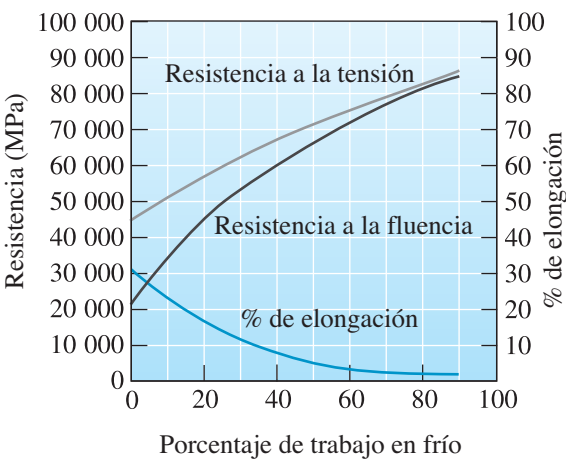


Figura 8-6 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

a la tensión se incrementan; sin embargo, la ductilidad disminuye y se aproxima a cero. El metal se rompe si se intenta más trabajo en frío; por lo tanto, existe una cantidad máxima de trabajo en frío o deformación que puede efectuarse sobre un material metálico antes de que se vuelva demasiado quebradizo y se rompa.

Ejemplo 8-1 *Trabajo en frío de una placa de cobre*

Una placa de cobre de 10 mm de grosor se reduce en frío a 5 mm y después a 1.6 mm. Determine el porcentaje total de trabajo en frío y la resistencia a la tensión de la placa de 1.6 mm (vea las figuras 8-6 y 8-7).

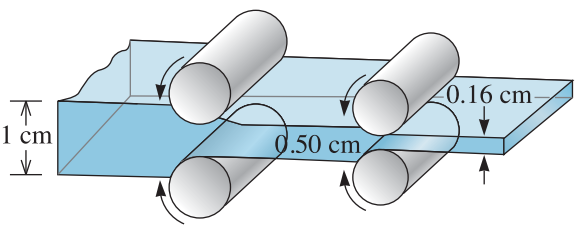


Figura 8-7 Diagrama que muestra el laminado de una placa de 1 cm a una placa de 0.16 cm (ejemplo 8-1).

SOLUCIÓN

Observe que debido a que el ancho de la placa no cambia durante el laminado, el trabajo en frío puede expresarse como el porcentaje de la reducción del grosor t.

La definición de trabajo en frío es el cambio del porcentaje entre las áreas original y final de la sección transversal, sin que importe cuántas etapas intermedias se deban cubrir. Por lo tanto, el trabajo en frío total es

$$\%\,\text{TF} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0}\right] \times 100 = \left[\frac{10 - 1.6}{10}\right] \times 100 = 84\%$$

y, a partir de la figura 8-6, la resistencia a la tensión es alrededor de 85,000 psi (o 586 MPa).

Se pueden predecir las propiedades de un metal o de una aleación si se conoce la cantidad de trabajo en frío durante el procesamiento. En consecuencia, se puede decidir si el componente tiene una resistencia adecuada en las partes críticas.

Cuando se desea seleccionar un material para fabricar una pieza que debe satisfacer ciertas propiedades mecánicas mínimas, se puede diseñar el proceso de deformación. Primero se determina el porcentaje necesario de trabajo en frío y después, con base en las dimensiones finales deseadas, se calculan las dimensiones originales del metal a partir de la ecuación del trabajo en frío.

Ejemplo 8-2 *Diseño de un proceso de trabajo en frío*

Diseñe un proceso de fabricación para producir una placa de cobre de 1 mm de grosor que tenga por lo menos una resistencia a la tensión de 448.2 MPa, una resistencia a la fluencia de 413.7 MPa y 5% de elongación.

SOLUCIÓN

A partir de la figura 8-6, se necesita por lo menos 35% de trabajo en frío para producir una resistencia a la tensión de 448.2 MPa psi y 40% de trabajo en frío para producir una resistencia a la fluencia de 413.7 MPa, pero menos de 45% de trabajo en frío para cumplir el requerimiento de 5% de elongación. Por lo tanto, cualquier trabajo en frío entre 40 y 45% satisface las propiedades mecánicas requeridas.

Para producir la placa sería apropiado implementar un proceso de laminado en frío. El grosor original de la placa de cobre antes del laminado puede calcularse a partir de la ecuación

8-5, suponiendo que no cambia el ancho de la placa. Debido a que hay un intervalo de trabajo en frío permisible, entre 40 y 45%, el intervalo del grosor inicial de la placa es:

$$\%\,\mathrm{TF}_{\text{mín}} = 40 = \left[\frac{t_{\text{mín}} - 0.1\ \text{mm}}{t_{\text{mín}}}\right] \times 100, \quad \therefore\ t_{\text{mín}} = 0.167\ \text{mm}$$

$$\%\,\mathrm{TF}_{\text{máx}} = 45 = \left[\frac{t_{\text{máx}} - 0.1\ \text{mm}}{t_{\text{máx}}}\right] \times 100, \quad \therefore\ t_{\text{máx}} = 0.182\ \text{mm}$$

Para producir la placa de cobre de 1 mm se comienza con una placa de 1.67 a 1.82 mm en la condición más blanda posible, después se lamina en frío de 40 a 45% para lograr el grosor de 1 mm.

8-4 Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales

Con frecuencia, durante la deformación plástica que se logra cuando se trabaja en frío o en caliente se produce una microestructura que consiste en granos que se alargan en dirección del esfuerzo aplicado (figura 8-8).

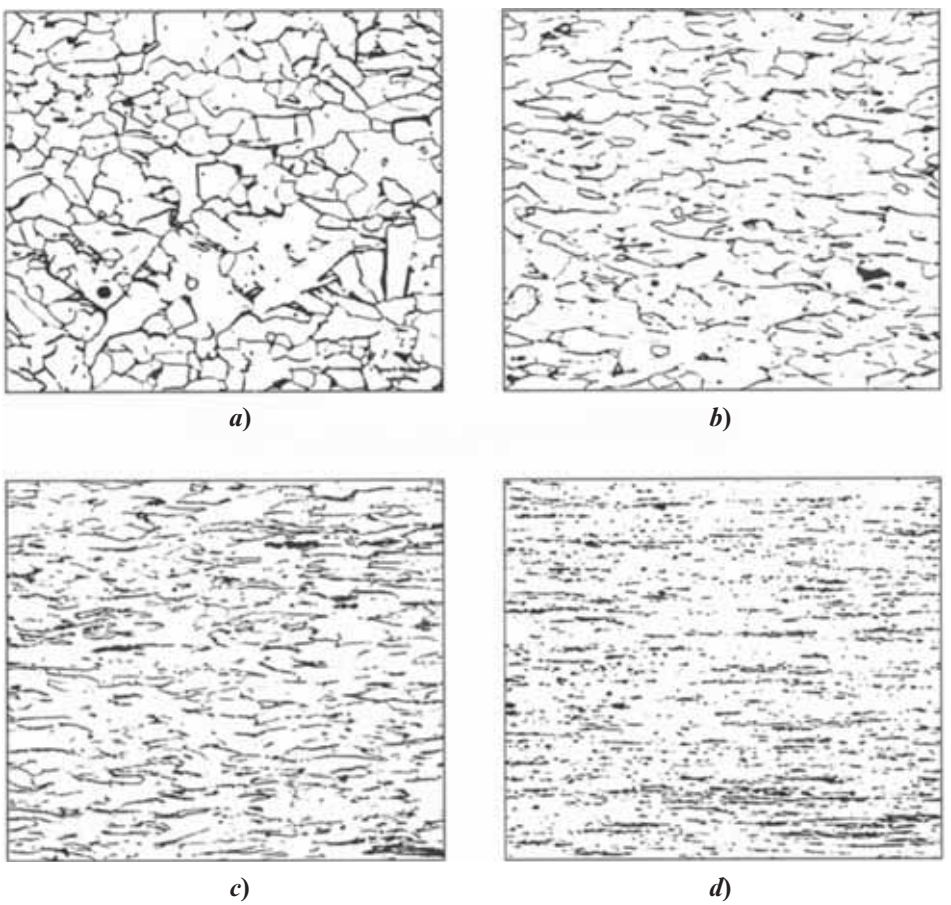


Figura 8-8 Estructura granular fibrosa de un acero al bajo carbono producida por el trabajo en frío: *a*) 10% de trabajo en frío, *b*) 30% de trabajo en frío, *c*) 60% de trabajo en frío y *d*) 90% de trabajo en frío (250 ×) [*De* ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure *(1985) ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados, www.asminternational.org*.]

Comportamiento anisotrópico

Durante la deformación, los granos rotan y se alargan, lo que ocasiona que ciertas direcciones y planos cristalográficos comiencen a alinearse en la dirección a la que se aplica el esfuerzo. En consecuencia, se desarrollan orientaciones, o texturas, preferidas y se produce un comportamiento anisotrópico.

En los procesos, como el trefilado y la extrusión, se produce una **textura fibrosa**. El término "fibrosa" se refiere a los granos en el material metálico, los cuales se alargan en una dirección paralela al eje del alambre o al producto extruido. En los metales CCCu, las direcciones <110> se alinean con el eje del alambre. En los metales CCCa, se alinean en las direcciones <111> o <100>. Este fenómeno da la resistencia más alta a lo largo del eje del alambre o del material extruido (es decir, el producto sometido a extrusión, como un tubo), que es lo que se desea.

Como ya se mencionó, se observa un comportamiento algo similar en los materiales termoplásticos cuando se trefilan en fibras u otras formas. La causa, como ya se explicó, es que las cadenas de polímero se alinean lado con lado (laterales) a lo largo de la longitud de la fibra. La resistencia es mayor a lo largo del eje de la fibra del polímero. Este tipo de endurecimiento también se observa en las botellas de plástico PET que se fabrican mediante el *proceso de soplado-estiramiento*. Este proceso provoca la alineación de las cadenas de polímero a lo largo de las direcciones radial y longitudinal, lo que conduce a un incremento de la resistencia de las botellas de PET a lo largo de esas direcciones.

En procesos como el laminado, los granos se orientan en una dirección y un plano cristalográfico preferido, dando una **textura laminar**. Las propiedades de una hoja o placa laminada dependen de la dirección en la que se mide la propiedad. La figura 8-9 resume las propiedades de tensión de una aleación de aluminio-litio trabajada en frío. En el caso de esta aleación, la resistencia es la más alta paralela a la dirección del laminado, mientras que la ductilidad es mayor a un ángulo de 45° con la dirección del laminado. Al endurecimiento que ocurre por el desarrollo de la anisotropía o de una textura se le conoce como **endurecimiento por textura**. Como se indicó en el capítulo 6, el módulo de Young de los materiales también depende de las direcciones cristalográficas de los monocristales.

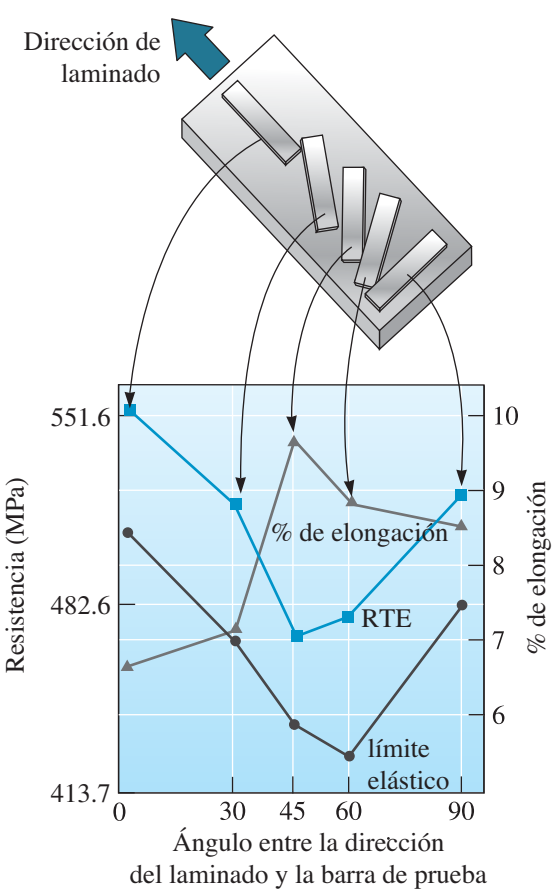


Figura 8-9 Comportamiento anisotrópico de un material laminado de aluminio-litio que se usa en aplicaciones aeroespaciales. La representación relaciona la posición de las barras de tensión con las propiedades mecánicas que se obtienen.

Tabla 8-2 Texturas de trefilado de alambre y extrusión y laminares en los materiales

Estructura cristalina	Textura fibrosa (dirección paralela al eje del alambre)	Textura laminar o de laminado
FCC	<111> y <100>	Planos {110} paralelos al plano del laminado. Direcciones <112> paralelas a la dirección del laminado
BCC	<110>	Planos {001} paralelos al plano del laminado. Direcciones <110> paralelas a la dirección del laminado.
HCP	$<1\bar{0}\bar{1}0>$	Planos {0001} paralelos al plano del laminado. Direcciones paralelas a la dirección del laminado.

Por ejemplo, el módulo de Young del hierro a lo largo de las direcciones [111] y [100] es de ~260 y 140 GPa, respectivamente. La dependencia de la resistencia de la fluencia de la textura es incluso mayor. El desarrollo de la textura no sólo tiene efecto sobre las propiedades mecánicas sino también sobre las propiedades magnéticas y otras de los materiales. Por ejemplo, los aceros magnéticos con granos orientados hechos a partir de 3% de Si y 97% de Fe que se usan en los núcleos de transformadores se texturizan por medio de un procesamiento termomecánico para optimizar sus propiedades eléctricas y magnéticas. En la tabla 8-2 se muestran algunas texturas fibrosas (trefilado de alambres) y de hoja (laminado) comunes con distintas estructuras cristalinas.

Desarrollo de la textura en películas delgadas

El desarrollo de la orientación o textura cristalográfica también ocurre en las películas delgadas. Con frecuencia, en el caso de las películas delgadas la textura es resultado de los mecanismos del proceso de crecimiento, no de los esfuerzos aplicados externamente. En algunas ocasiones, los esfuerzos térmicos generados internamente también desempeñan una función para determinar la textura cristalográfica de las películas delgadas. Además, cuando éstas son orientadas pueden ofrecer mejores propiedades eléctricas, ópticas o magnéticas. El **análisis de figura de polo**, técnica basada en la difracción de rayos X (DRX) (capítulo 3), o una técnica de microscopia electrónica de barrido especializada que se conoce como **microscopia de orientación** se utilizan para identificar las texturas en los diferentes materiales de ingeniería (películas, hojas, cristales sencillos, etcétera).

Esfuerzos residuales

Una pequeña parte del esfuerzo aplicado se almacena en forma de **esfuerzos residuales** dentro de la estructura como una intrincada red de dislocaciones. La presencia de dislocaciones incrementa la energía interna total de la estructura. A medida que aumenta la extensión del trabajo en frío, aumenta el nivel de la energía interna total del material. Los esfuerzos residuales que genera el trabajo en frío pueden no ser siempre deseables y mitigarse por medio de un tratamiento térmico conocido como **recocido para atenuar esfuerzos** (sección 8-6). Como se explicará en breve, en algunos casos se generan, de manera deliberada, esfuerzos de compresión residuales en la superficie de los materiales para mejorar sus propiedades mecánicas.

Los esfuerzos residuales no son uniformes a lo largo del material metálico deformado. Por ejemplo, pueden presentarse esfuerzos residuales de compresión altos en la superficie de la placa laminada mientras que en el centro pueden almacenarse esfuerzos de tensión altos. Si se maquina una pequeña cantidad de metal de una superficie de una pieza trabajada en frío, se elimina el metal que sólo contiene esfuerzos residuales de compresión. Para restaurar el balance, la placa debe distorsionarse. Si existe un esfuerzo residual de compresión neto en la superficie de una pieza, pueden beneficiarse las propiedades mecánicas, dado que es probable que cualquier grieta o fisura en la superficie no crezca. Estas son las razones por las cuales cualquier esfuerzo residual, originado por el trabajo en frío o cualquier otra fuente, afecta la capacidad de la pieza para soportar una carga (figura 8-10). Si se aplica un esfuerzo a la tensión a un material que ya contiene esfuerzos residuales de tensión, el esfuerzo total que actúa sobre la pieza es la suma de los esfuerzos aplicados y residuales. Sin embargo, si se almacenan esfuerzos de compresión en la superficie de una pieza metálica, el esfuerzo a la tensión que se aplique debe balancear primero los esfuerzos residuales de compresión. Luego de ello la pieza puede llegar a soportar una carga mayor a la normal. En el capítulo 7 se explicó que la fatiga es un mecanismo de falla común de los componentes de soporte de carga. En algunas ocasiones, los

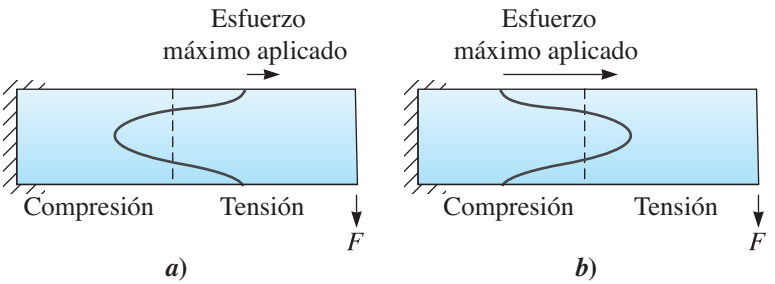


Figura 8-10 Los esfuerzos residuales pueden ser dañinos o beneficiosos. *a*) Una fuerza de flexión aplica un esfuerzo a la tensión sobre la parte superior de la viga. Dado que ya existen esfuerzos residuales a la tensión en la parte superior, las características de soporte de carga son deficientes. *b*) La parte superior contiene esfuerzos residuales de compresión. En este caso, las características de soporte de carga son muy buenas.

componentes que están sujetos a falla por fatiga pueden endurecerse por **granallado**. Al bombardear la superficie con bolas de acero disparadas a alta velocidad se generan esfuerzos residuales de compresión en la superficie que incrementan la resistencia de la superficie metálica a la falla por fatiga (capítulo 7). El ejemplo 8-3 explica el uso del granallado.

Ejemplo 8-3 *Diseño de una flecha resistente a la fatiga*

Su empresa ha fabricado varios miles de ejes que tienen una resistencia a la fatiga de 137.9 MPa. Las piezas sufren altas cargas de flexión durante su rotación. Sus ingenieros de ventas reportan que los primeros ejes colocados en servicio pronto fallaron por fatiga. Diseñe un proceso por medio del cual puedan salvarse los ejes restantes luego de mejorar sus propiedades de fatiga.

SOLUCIÓN

Por lo general, las fallas por fatiga comienzan en la superficie de una pieza giratoria; por lo tanto, el incremento de la resistencia en la superficie mejora la vida a fatiga del eje. Podrían utilizarse diversos métodos para lograr este objetivo.

Si el eje está fabricado con acero, se podría carburizar su superficie (capítulo 5). Mediante la carburización se aplica carbono en la superficie de la pieza. Después de un tratamiento térmico apropiado, el contenido mayor de carbono en la superficie incrementa la resistencia de ésta y, quizá más importante, genera esfuerzos residuales de *compresión* en ella.

Podría considerarse trabajar en frío el eje, pues este procedimiento incrementa la resistencia a la fluencia del metal y, si se realiza de manera adecuada, introduce esfuerzos residuales de compresión. El trabajo en frío también reduce el diámetro del eje y, debido al cambio dimensional, éste podría no ser apto para desempeñar su función.

Otra alternativa es granallar el eje. El granallado genera esfuerzos residuales de compresión locales en la superficie sin modificar las dimensiones de la pieza. Este proceso, que también es económico, podría ser suficiente para salvar los ejes restantes.

Templado y recocido de vidrios

Los esfuerzos residuales que se originan durante el enfriamiento de los vidrios son de interés considerable. En los vidrios, los esfuerzos residuales se pueden tratar de dos maneras. Primero, se puede volver a calentar el vidrio a una temperatura alta conocida como *punto de recocido* (de ~450°C en el caso de los vidrios de silicato con una viscosidad de $\sim 10^{12}$ Pa · s) y enfriarla lentamente, de tal manera que se enfríe por dentro y por fuera a aproximadamente la misma velocidad. El vidrio resultante padecerá poco o ningún esfuerzo residual. A este proceso se le conoce como **recocido**, y el vidrio resultante que está casi libre de esfuerzo se conoce como **vidrio recocido**. El propósito del recocido de vidrios y el proceso conocido como recocido de

alivio de esfuerzo que se aplica a los materiales metálicos es el mismo (es decir, eliminar o disminuir de forma significativa el nivel de esfuerzo residual). Sin embargo, el origen del esfuerzo residual es diferente en el caso de estos materiales. Otra opción a la que se puede recurrir durante el procesamiento de vidrios es aplicar un tratamiento térmico que genere esfuerzos de compresión sobre la superficie del material; a esto se le conoce como **templado**. Al vidrio resultante se le conoce como **vidrio templado,** el cual se obtiene calentando el vidrio hasta una temperatura inmediatamente inferior al punto de recocido, para después dejar que la superficie se enfríe con mayor rapidez que el centro. Este proceso genera un esfuerzo de compresión uniforme en la superficie del vidrio. La región central permanece bajo un esfuerzo a la tensión. También es posible intercambiar iones en la estructura del vidrio e introducir un esfuerzo de compresión. A esto se le conoce como *templado químico*.

En el capítulo 7 se explicó que la resistencia del vidrio depende de las imperfecciones en la superficie. Si se ejerce un esfuerzo de compresión en la superficie del vidrio y un esfuerzo a la tensión en el centro (de tal manera que el esfuerzo total es cero), la resistencia del vidrio se mejora de forma significativa. Cualquier microgrieta no crecerá con rapidez, debido a la presencia de un esfuerzo de compresión neto sobre la superficie del vidrio. Sin embargo, si se produce un gran impacto, la grieta penetra a través de la región donde el esfuerzo es de compresión y el vidrio se hace pedazos.

Los vidrios templados tienen varios usos. Por ejemplo, los paneles de ventanas laterales y traseras de automóviles se fabrican con este material. Ciertos productos, como pantallas para chimenea, hornos, estanterías, mobiliario y refrigeradores, también se construyen con vidrio templado. Los parabrisas de los automóviles usan **vidrio laminado de seguridad**. El vidrio del parabrisas frontal está hecho de dos piezas de vidrio recocido laminadas que contienen un plástico conocido como butiral de polivinilo (PVB). Si el parabrisas se rompe, las piezas de vidrio laminadas se mantienen unidas entre sí por medio del plástico, lo cual ayuda a minimizar las heridas del conductor y los pasajeros. Además, este tipo de vidrio reduce la probabilidad de que las fracciones de vidrio corten los tejidos de las bolsas de aire que es probable que se desplieguen de forma simultánea.

8-5 Características del trabajo en frío

Endurecer un material metálico por medio de trabajo en frío o endurecimiento por deformación implica varias ventajas y algunas limitaciones.

- Se puede endurecer el material metálico y producir la forma final deseada de manera simultánea.
- Se pueden obtener excelentes tolerancias dimensionales y acabados de superficie por medio del proceso de trabajo en frío.
- Este proceso puede ser un método económico para producir grandes números de piezas pequeñas.
- Algunos metales, como el magnesio CH, tienen un número limitado de sistemas de deslizamiento y son bastante quebradizos a temperatura ambiente; por lo tanto, sólo puede lograrse un grado pequeño de trabajo en frío.
- El trabajo en frío afecta la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión.
- Dado que el trabajo en frío reduce la conductividad eléctrica en menor grado que otros procesos de endurecimiento, como la introducción de elementos aleantes (figura 8-11), es una manera satisfactoria de endurecer materiales conductores, como los alambres de cobre que se usan para la transmisión de energía eléctrica.
- Los esfuerzos residuales controlados de manera apropiada y el comportamiento anisotrópico pueden ser útiles; sin embargo, si los esfuerzos residuales no se controlan de manera adecuada, las propiedades de los materiales se reducen notablemente.
- Como se verá en la sección 8-6, dado que el efecto del trabajo en frío disminuye o se elimina a temperaturas altas, no se lo puede utilizar como un mecanismo de endurecimiento de piezas que sufrirán altas temperaturas durante su empleo o servicio.

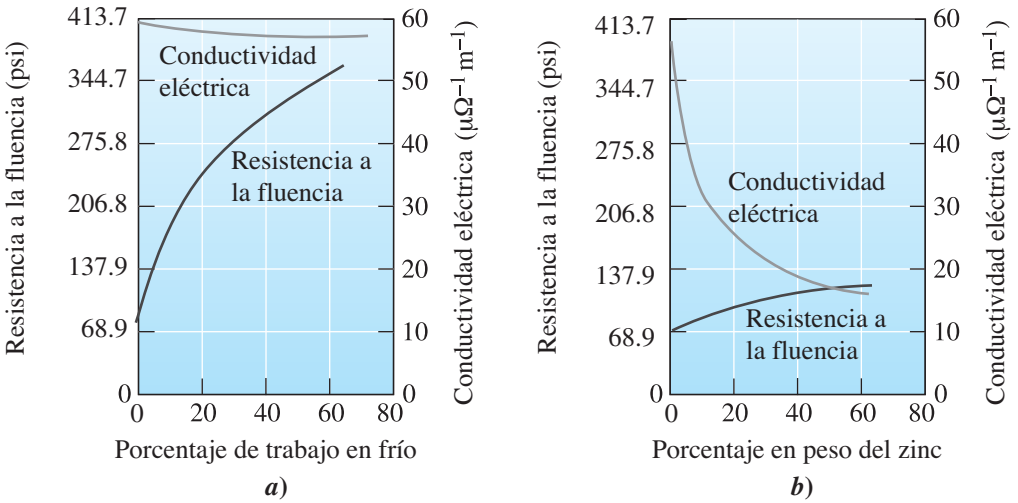


Figura 8-11 Comparación del endurecimiento del cobre por medio de *a*) trabajo en frío y *b*) aleación con zinc. Observe que el trabajo en frío produce un endurecimiento mayor, pero tiene poco efecto sobre la conductividad eléctrica.

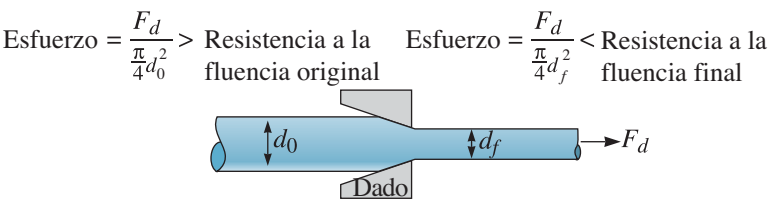


Figura 8-12 Proceso del trefilado de alambres. La fuerza F_d actúa sobre los diámetros original y final. Por lo tanto, el esfuerzo producido en el alambre final es mayor que en el original. Si el alambre no se endureciera por deformación durante el trefilado, el alambre final se rompería antes de que se hubiera podido pasar el alambre original a través del dado.

- Algunas técnicas de procesamiento de deformación sólo pueden lograrse si se utiliza el trabajo en frío. Por ejemplo, el trefilado de alambres requiere que se pase una barra a través de un dado para producir un área más pequeña de la sección transversal (figura 8-12). En el caso de una fuerza de trefilado F_d, se produce un esfuerzo diferente en el alambre original y final. El esfuerzo sobre el alambre inicial debe superar la resistencia a la fluencia del metal para ocasionar deformación. El esfuerzo sobre el alambre final debe ser menor que su resistencia a la fluencia para prevenir la falla. Este objetivo se logra sólo si el alambre se endurece por deformación durante el trefilado.

Ejemplo 8-4 *Diseño de un proceso de trefilado de alambre*

Diseñe un proceso para producir alambre de cobre de 5.08 mm de diámetro. Las propiedades mecánicas del cobre se muestran en la figura 8-6.

SOLUCIÓN

El trefilado de alambre es la técnica obvia para fabricar esta aplicación. Para producir el alambre de cobre de la manera más eficiente posible, se debe realizar la mayor reducción del diámetro. El diseño debe asegurar que el alambre se endurezca por deformación lo suficiente durante el trefilado para evitar que se rompa el alambre que resulte .

Como cálculo de ejemplo, se supone que el diámetro inicial del alambre de cobre es de 10.16 mm y que el alambre está en su condición más blanda posible. El trabajo en frío es

$$\%\,\text{TF} = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0}\right] \times 100 = \left[\frac{(\pi/4)d_0^2 - (\pi/4)d_f^2}{(\pi/4)d_0^2}\right] \times 100$$
$$= \left[\frac{(10.16)^2 - (5.08)^2}{(10.16)^2}\right] \times 100 = 75\%$$

A partir de la figura 8-6, la resistencia a la fluencia inicial sin trabajo en frío es de 151.68 MPa. La resistencia a la fluencia final con 75% de trabajo en frío es de alrededor de 551.6 MPa (con muy poca ductilidad). La fuerza de trefilado que se requiere para deformar el alambre inicial es

$$F = S_y A_0 = (151.68 \times 10^6)(\pi/4)(0.01016)^2 = 12.3 \text{ kN}$$

El esfuerzo que actúa sobre el alambre después de pasar a través del dado es

$$S = \frac{F_d}{A_f} = \frac{12.3 \times 10^3 \text{ N}}{(\pi/4)(0.00508 \text{ m})^2} = 606.7 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de 606.7 MPa aplicado sobre el alambre trefilado es mayor que su resistencia a la fluencia, de 551.6 MPa. Por lo tanto, el alambre se rompe, dado que el porcentaje de elongación es casi cero.

Se puede realizar el mismo conjunto de cálculos para otros diámetros iniciales, con los resultados que se muestran en la tabla 8-3 y en la figura 8-13.

La gráfica muestra que el esfuerzo de trefilado es mayor que la resistencia a la fluencia del alambre trefilado cuando el diámetro original es de alrededor de 9.4 mm. Para producir el alambre de la manera más eficiente posible, el diámetro original debe estar justo debajo de 9.4 mm.

Tabla 8-3 Propiedades mecánicas del alambre de cobre (vea el ejemplo 8-4)

d_0 (mm)	Porcentaje de TF	Resistencia a la fluencia del alambre trefilado (MPa)	Fuerza (kN)	Esfuerzo de trefilado sobre el alambre (MPa)
6.35	36	400	4.804	237
7.62	56	482.6	6.92	341.3
8.89	67	510.2	9.42	464.6
10.16	75	551.6	12.3	607

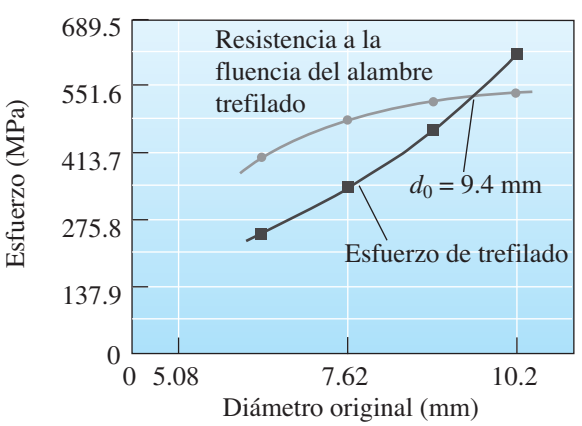


Figura 8-13 Resistencia a la fluencia y esfuerzo de trefilado del alambre (ejemplo 8-4).

8-6 Las tres etapas del recocido

El trabajo en frío es un mecanismo de endurecimiento útil y una herramienta eficaz para conformar materiales mediante el trefilado de alambre, el laminado, la extrusión, etc. En algunas ocasiones, el trabajo en frío produce algunos efectos no deseables. Por ejemplo, la pérdida de ductilidad o el desarrollo de esfuerzos residuales pueden ser perjudiciales para ciertas aplicaciones. Dado que el trabajo en frío o endurecimiento por deformación es resultado del incremento de la densidad de las dislocaciones, se puede suponer que cualquier tratamiento para reacomodar o eliminar las dislocaciones invierte los efectos del trabajo en frío.

El **recocido** es un tratamiento térmico que se utiliza para eliminar algunos o todos los efectos del trabajo en frío. Este procedimiento puede utilizarse a temperatura baja para eliminar los esfuerzos residuales producidos durante el trabajo en frío sin afectar las propiedades mecánicas de la pieza finalizada, o para eliminar por completo el endurecimiento por deformación alcanzado durante el trabajo en frío. En este caso, la parte final es blanda y dúctil, pero logra un acabado de superficie y precisión dimensional buenos. Después del recocido, se puede realizar un trabajo en frío adicional, dado que la ductilidad se restaura; si se combinan ciclos de repetición de trabajo en frío y recocido pueden alcanzarse deformaciones totales grandes. Existen tres etapas posibles en el proceso de recocido; en la figura 8-14 se muestran sus efectos sobre las propiedades del latón.

Observe que el término "recocido" también se utiliza para describir otros tratamientos térmicos. Por ejemplo, los vidrios pueden recocerse, o tratarse térmicamente, para eliminar los esfuerzos residuales. Los hierros colados y los aceros también pueden recocerse para producir una ductilidad máxima, aun cuando el material no haya sido sometido previamente a un trabajo en frío. En capítulos posteriores se explicarán estos tratamientos térmicos de recocido.

Recuperación

La microestructura original trabajada en frío está compuesta por granos deformados que contienen un gran número de dislocaciones enredadas. Cuando se calienta primero

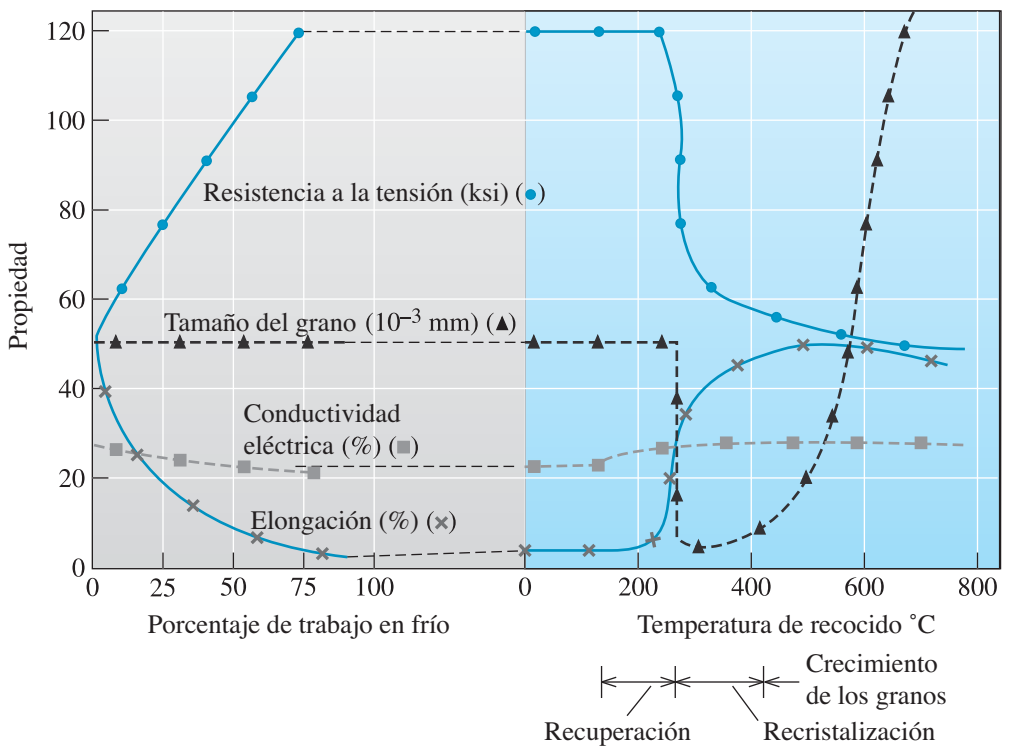


Figura 8-14 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de Cu-35% Zn y de la temperatura de recocido sobre las propiedades de una aleación de Cu-35% Zn que está 75% trabajada en frío. La conductividad eléctrica se define con base en el estándar internacional de recocido del cobre en el que 100% es igual a 5.80×10^7 siemens por metro (5.80×10^5 ohm$^{-1} \cdot$ cm^{-1}).

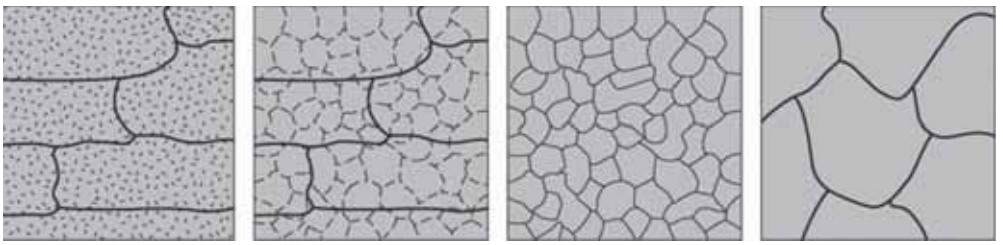


Figura 8-15 Efecto de la temperatura de recocido sobre la microestructura de los metales trabajados en frío. *a*) Trabajado en frío, *b*) después de la recuperación, *c*) después de la recristalización y *d*) después del crecimiento de los granos.

el metal, la energía térmica adicional permite que las dislocaciones se muevan y formen los límites de una **estructura subgranular poligonizada** (figura 8-15). Sin embargo, la densidad de las dislocaciones permanece casi sin cambio. A baja temperatura, este tratamiento, al que se le llama **recuperación,** elimina los esfuerzos residuales que provoca el trabajo en frío sin provocar un cambio en la densidad de las dislocaciones.

Las propiedades mecánicas del metal permanecen relativamente sin cambio, debido a que no se reduce el número de dislocaciones durante la recuperación. Dado que se reducen o incluso se eliminan los esfuerzos residuales cuando se reacomodan las dislocaciones, con frecuencia a la recuperación se le llama recocido de alivio de esfuerzo. Además, la recuperación restaura la conductividad eléctrica alta del metal, lo que permite fabricar alambre de cobre o aluminio para transmitir energía eléctrica que sea resistente pero que, a la vez, mantenga una buena conductividad. Por último, la recuperación con frecuencia mejora la resistencia a la corrosión del material.

Recristalización

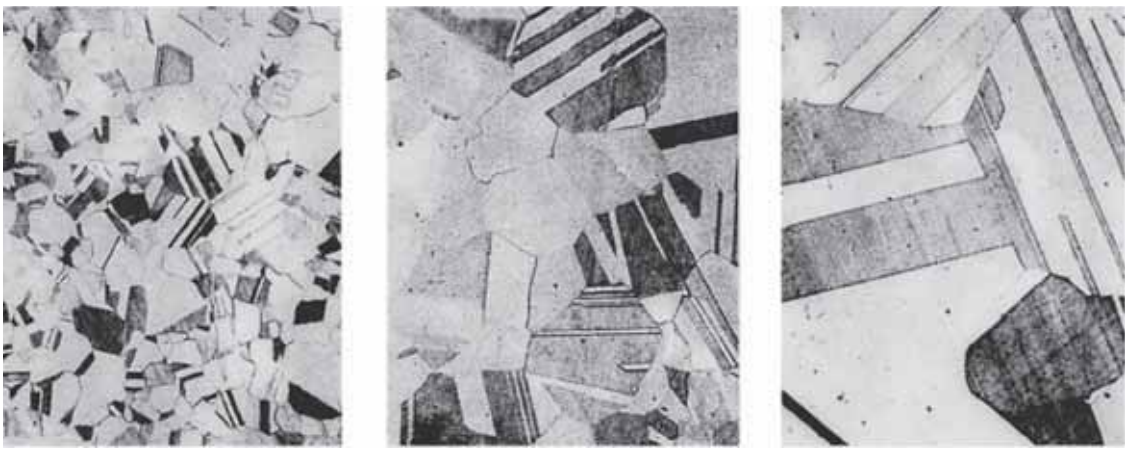
Cuando se calienta un metal trabajado en frío por encima de cierta temperatura, la recuperación rápida elimina los esfuerzos residuales y produce una estructura de dislocaciones poligonizada. En ese momento ocurre la formación de núcleos de nuevos granos pequeños en los límites de la celdas de la estructura poligonizada, lo cual elimina la mayoría de las dislocaciones (figura 8-15). Debido a que el número de dislocaciones se reduce en gran medida, el metal recristalizado tiene una resistencia baja, pero una ductilidad alta. A la temperatura a la que aparece una microestructura de nuevos granos que tienen una densidad de dislocaciones muy baja se le conoce como **temperatura de recristalización**. Al proceso de formación de nuevos granos por medio del tratamiento térmico a un material trabajado en frío se le conoce como **recristalización**. Como se verá en la sección 8-7, la temperatura de recristalización depende de diversas variables y no es una temperatura fija.

Crecimiento de granos

A temperaturas de recocido aún más altas, la recuperación y la recristalización ocurren de manera rápida, lo cual genera una estructura granular recristalizada fina. Si la temperatura es lo suficientemente alta, algunos granos comienzan a crecer, a la vez que eliminan a los granos más pequeños (figura 8-16). Este fenómeno, llamado *crecimiento de granos*, se lleva a cabo por medio de la reducción en el área de los límites de los granos. Tal como se ilustra en el caso de una aleación de cobre-zinc en la figura 8-16, el crecimiento de los granos casi siempre es no deseable. Recuerde que este fenómeno afecta a la mayoría de los materiales si éstos se someten a una temperatura lo suficientemente alta y, como tal, no está relacionado con el trabajo en frío. Por lo tanto, la recristalización o la recuperación no son necesarias para que ocurra el crecimiento de granos.

Es posible que usted sepa que las bombillas de luz incandescente contienen filamentos fabricados de tungsteno. La temperatura de operación alta provoca el crecimiento de granos y es uno de los factores que ocasionan la falla del filamento.

Los materiales cerámicos, los que por lo general no sufren ningún endurecimiento significativo por deformación, muestran un nivel considerable de crecimiento de granos. También, puede ocurrir un crecimiento anormal de granos en algunos materiales como resultado de una formación de fase líquida durante la sinterización. En algunas ocasiones el crecimiento de granos es deseable, como en el caso de las cerámicas de alúmina para fabricar los materiales ópticos que se usan en el alumbrado. En esta aplicación se desea contar con granos muy grandes, dado que tiene que minimizarse la dis-



a) *b*) *c*)

Figura 8-16 Fotomicrografía que muestra el efecto de la temperatura de recocido sobre el tamaño de los granos del latón. También pueden observarse límites de macla en las estructuras. *a*) Recocido a 400°C, *b*) recocido a 650°C y *c*) recocido a 800°C (75 ×). (*Brick, R. y Phillips*, A., The Structure and Properties of Alloys, *1949: McGraw-Hill© The Mc Graw-Hill Companies, Inc.*)

persión de la luz de los límites de granos. Algunos investigadores también han desarrollado métodos para hacer crecer a los monocristales de materiales cerámicos empleando el crecimiento de granos.

8-7 Control del recocido

En muchas piezas de materiales metálicos se necesita una combinación de resistencia y tenacidad. Por lo tanto, se deben diseñar procesos que involucren el moldeo por medio de trabajo en frío. Después se vuelve necesario controlar el proceso de recocido con la finalidad de obtener la ductilidad deseada. Para diseñar un tratamiento térmico de recocido adecuado se tienen que conocer la temperatura de recristalización y el tamaño de los granos recristalizados.

Temperatura de recristalización

Esta es la temperatura a la que los granos en la microestructura trabajada en frío comienzan a transformarse en granos equiaxiales nuevos y libres de dislocaciones. La fuerza motriz de la recristalización es la diferencia entre las energías internas de un material trabajado en frío y uno recristalizado. Es importante destacar que la temperatura de recristalización *no* es una temperatura fija, como la temperatura de fusión de un elemento puro, pues es afectada por diversas variables del procesamiento:

- La temperatura de recristalización disminuye cuando aumenta la cantidad de trabajo en frío. Cantidades mayores de trabajo en frío restan estabilidad al metal y propician la nucleación de los granos recristalizados. Existe una cantidad mínima de trabajo en frío, alrededor de 30 a 40%, debajo de la cual no ocurrirá la recristalización.
- El tamaño menor inicial de los granos trabajados en frío reduce la temperatura de recristalización, pues ello genera más sitios —los antiguos límites de los granos— en los que pueden nuclearse nuevos granos.
- Los metales puros se recristalizan a temperaturas más bajas que las aleaciones.
- El incremento del tiempo de recocido disminuye la temperatura de recristalización (figura 8-17), dado que se dispone de más tiempo para la nucleación y el crecimiento de los nuevos granos recristalizados.
- Las aleaciones con puntos de fusión más altos tienen una temperatura de recristalización más alta. Dado que la recristalización es un proceso controlado por difusión, la temperatura de recristalización es casi proporcional a 0.4 T_f(kelvin), donde T_f es la temperatura de fusión. En la tabla 8-4 se muestran las temperaturas de recristalización comunes de los metales seleccionados.

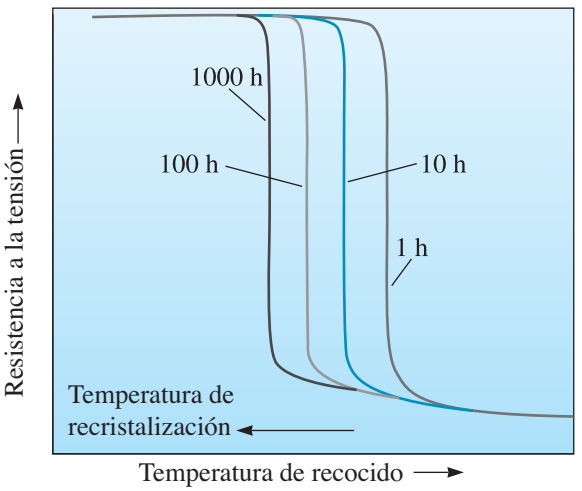


Figura 8-17 Los tiempos de recocido más extensos disminuyen la temperatura de recristalización. Observe que la temperatura de recristalización no es una temperatura fija.

Tabla 8-4 Temperaturas típicas de recristalización de algunos metales

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de recristalización (°C)
Sn	232	−4
Pb	327	−4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Basado en Structure and Properties of Engineering Materials*, de R. M. Brick y cols.: McGraw-Hill, 1977.)*

El concepto de temperatura de recristalización es muy importante, dado que también define el límite entre el trabajo en frío y el trabajo en caliente de un material metálico. Si se lleva a cabo la deformación (moldeo) de un material por encima de la temperatura de recristalización, esta tarea se conoce como trabajo en caliente. Si se conduce el moldeo o deformación a una temperatura por debajo de la temperatura de recristalización, se le denomina trabajo en frío. Como puede observarse en la tabla 8-4, en el caso del plomo o del estaño deformados a 25°C, ¡se está llevando a cabo un trabajo en caliente! Esta es la razón de por qué el hierro puede trabajarse en frío a temperatura ambiente, pero no el plomo o el estaño. Para que el tungsteno se deforme a 1000°C, ¡se está llevando a cabo un trabajo en frío! En algunos casos, los procesos que se realizan por encima de 0.6 veces la temperatura de fusión del metal (en K) se consideran como trabajo en caliente. Los procesos que se llevan a cabo por debajo de 0.3 veces la temperatura de fusión se consideran trabajo en frío y los que se efectúan entre 0.3 y 0.6 veces T_f se consideran **trabajo en tibio**. Sin embargo, estas descripciones de intervalos que definen el trabajo en caliente, en frío y en tibio, son aproximadas y deben emplearse con cuidado.

Tamaño de los granos recristalizados

Diversos factores influyen en el tamaño de los granos recristalizados. La reducción de la temperatura de recocido, el tiempo que se requiere para calentar a la temperatura de recocido o el tiempo de recocido reducen el tamaño de los granos pues minimizan la oportunidad del crecimiento de los granos. El incremento del trabajo en frío también reduce el tamaño final de los granos pues genera un gran número de sitios de nucleación en los cuales se pueden insertar los nuevos granos. Por último, la presencia de una segunda fase en la microestructura puede fomentar u obstaculizar la recristalización y el crecimiento de los granos, lo cual depende de su arreglo y tamaño.

8-8 Recocido y procesamiento de materiales

Los efectos de la recuperación, la recristalización y el crecimiento de los granos son importantes en el procesamiento y uso eventual de un metal o una aleación.

Procesamiento de deformación

Mediante el aprovechamiento del tratamiento térmico de recocido se puede incrementar la cantidad total de deformación que puede lograrse. Si se requiere reducir una placa de 5 pulg de grosor a una hoja de 0.05 pulg, puede realizarse el trabajo en frío máximo permisible, recocer para restaurar el metal a su condición blanda y dúctil, y después trabajar de nuevo en frío. Se puede repetir el ciclo de trabajo en frío-recocido hasta que se aproxime al grosor adecuado. Puede diseñarse la etapa final de trabajo en frío para que produzca las dimensiones finales y las propiedades que se requieren, como en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 8-5 ***Diseño de un proceso para producir una tira de cobre***

Se desea producir una tira de cobre de 1 mm de grosor y 60 mm de ancho que tenga, por lo menos, una resistencia a la fluencia de 413.7 MPa y una elongación de 5%. Sólo se pueden adquirir tiras de 60 mm de ancho con un grosor de 50 mm. Diseñe un proceso que dé como resultado el producto que se necesita. Cuando sea necesario, remítase a la figura 8-6.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 8-2 se encontró que las propiedades requeridas pueden obtenerse con un trabajo en frío de 40 a 45%. Por lo tanto, el grosor inicial debe estar entre 1.67 mm y 1.82 mm y esta materia prima debe ser lo más blanda posible, es decir, en la condición de recocido. Dado que sólo se pueden adquirir materias primas de 50 mm de grosor, se debe reducir el grosor de las tiras de 5 cm a 1.67 mm y 1.82 mm, y después debe recocerse la tira antes del trabajo en frío final. Pero, ¿puede llevarse a cabo con éxito el trabajo en frío de 5 a 0.182 cm?

$$\%\,\text{TF} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0}\right] \times 100 = \left[\frac{50 - 1.82}{50}\right] \times 100 = 96.4\%$$

Con base en la figura 8-6, se permite un máximo de alrededor de 90% de trabajo en frío. Por ello, se debe realizar una serie de ciclos de trabajo en frío y recocido. Aunque existen varias combinaciones posibles, una es como la que sigue:

1. Trabajar en frío a 80% la tira hasta llegar de 50 mm a 10 mm:

$$80 = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0}\right] \times 100 = \left[\frac{50 - t_f}{50}\right] \times 100 \quad \text{o} \quad t_f = 10\ \text{mm}$$

2. Recocer la tira de 10 mm para restaurar la ductilidad. Si no se conoce la temperatura de recristalización, se puede utilizar la relación 0.4 T_f para obtener una estimación. El punto de fusión del cobre es de 1085°C:

$$T_r \cong (0.4)(1085 + 273) = 543\ \text{K} = 270\,^{\circ}\text{C}$$

3. Trabajar en frío la tira de 10 mm a 1.82 mm:

$$\%\,\text{FT} = \left[\frac{10 - 1.82}{10}\right] \times 100 = 81.8\%$$

4. Recocer de nuevo el cobre a 270°C para restaurar la ductilidad.
5. Por último, trabajar en frío a 45% de 1.82 mm a la dimensión final de 1 mm. Este proceso proporciona las dimensiones finales y las propiedades correctas.

Servicio a temperaturas altas

Como ya se mencionó, ni el endurecimiento por deformación ni por tamaño de los granos (ecuación de Hall-Petch, capítulo 4) son apropiadas para una aleación que se utilizará a altas temperaturas, como en las aplicaciones resistentes a la termofluencia. Cuando se coloca en servicio a una temperatura alta el metal trabajado en frío, la recristalización ocasiona de inmediato una disminución catastrófica de la resistencia. Además, si la temperatura es lo suficientemente alta, la resistencia continúa en descenso, debido al crecimiento de los granos recién recristalizados.

Procesos de unión

Los materiales metálicos pueden unirse por medio de procesos como la soldadura. Cuando se une un metal trabajado en frío mediante soldadura, el metal adyacente a la soldadura se calienta por encima de las temperaturas de recristalización y de crecimiento de granos y después se enfría lentamente. A esta región se le llama **zona afectada por el calor** (**ZAC**). En la figura 8-18 se muestran la estructura y las propiedades en la zona afectada por el calor de una soldadura. Las propiedades mecánicas se reducen de forma catastrófica, dado el calor que genera el proceso de soldadura.

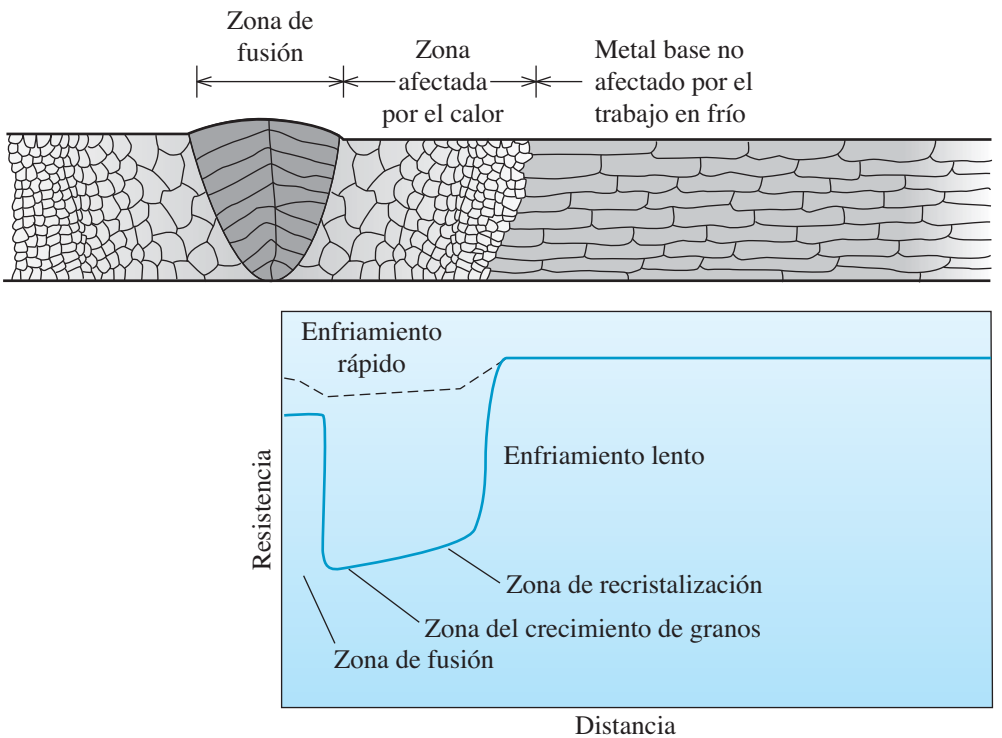


Figura 8-18 Estructura y propiedades que rodean una soldadura de fusión en un metal trabajado en frío. Sólo se marca en el diagrama el lado derecho de la zona afectada por el calor. Observe la pérdida de resistencia provocada por la recristalización y el crecimiento de granos en la zona afectada por el calor.

Los procesos de soldadura, como aquella que se realiza con haz de electrones o con láser, los cuales generan altas velocidades de entrada de calor por breves periodos y, por lo tanto, después se enfrían con igual rapidez, minimizan la exposición de los materiales metálicos a temperaturas por encima de la de recristalización y disminuyen este tipo de daño. De modo similar, un proceso conocido como soldadura de agitación con fricción no genera casi ninguna ZAC y se utiliza comercialmente para soldar aleaciones de aluminio.

8-9 Trabajo en caliente

Es posible darle la forma que se desea a un metal por medio del trabajo en caliente en vez del trabajo en frío. Como ya se describió, el trabajo en caliente se define como la deformación plástica del material metálico a una temperatura por encima de la temperatura de recristalización. Durante el trabajo en caliente, el material metálico se recristaliza continuamente (figura 8-19). Como ya se explicó, a temperatura ambiente el plomo está muy por encima de su temperatura de recristalización de −4°C y, por lo tanto, no se endurece por deformación y permanece blando y dúctil a temperatura ambiente.

Ausencia de endurecimiento No ocurre endurecimiento durante la deformación por trabajo en caliente; en consecuencia, la magnitud de la deformación plástica es casi ilimitada. Una placa muy gruesa puede reducirse a una hoja delgada mediante una serie continua de operaciones. Las primeras etapas del proceso se llevan a cabo muy por encima de la temperatura de recristalización para aprovechar la menor resistencia del material metálico. La última etapa se realiza justo por encima de la temperatura de recristalización, utilizando un gran porcentaje de deformación para producir el tamaño de grano más fino posible.

El trabajo en caliente es muy adecuado para formar piezas grandes, dado que el metal tiene una resistencia a la fluencia baja y una alta ductilidad a altas temperaturas. Además, los metales CH (como el magnesio) tienen más sistemas de deslizamiento activos a temperaturas de trabajo en caliente; la ductilidad mayor permite deformaciones más grandes que las posibles por medio del trabajo en frío. El ejemplo 8-6 ilustra el diseño de un proceso de trabajo en caliente.

Eliminación de imperfecciones Algunas imperfecciones en el material metálico original pueden eliminarse o minimizar sus efectos. Los poros gaseosos pueden cerrarse y soldarse durante el trabajo en caliente (el pliegue interno que se forma cuando se cierra el poro se elimina por difusión durante el proceso de formación y enfriamiento). Las diferencias entre las diversas composiciones del metal pueden reducirse a medida que el trabajo en caliente acerca más la superficie y el centro de la placa, lo que reduce las distancias de difusión.

Comportamiento anisotrópico Las propiedades finales de las piezas trabajadas en caliente no son isotrópicas. Los rodillos o moldes de formación, los cuales por lo general están a

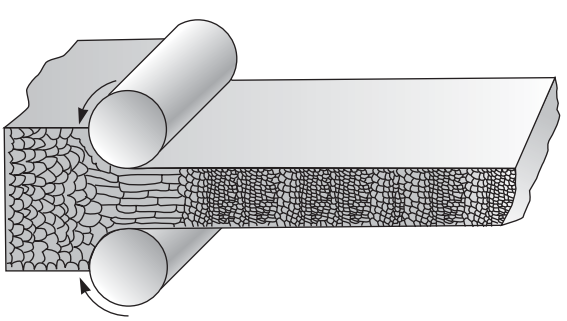


Figura 8-19 Durante el trabajo en caliente los granos anisotrópicos alargados se recristalizan de inmediato. Si se controla de forma adecuada la temperatura del trabajo en caliente, el tamaño final de los granos trabajados en caliente puede ser muy fino.

una temperatura menor que la del metal, enfrían la superficie más rápido que el centro de la pieza. En consecuencia, el tamaño de grano de la superficie es más pequeño que el del centro. Además, se produce una estructura fibrosa debido a que las inclusiones, y las partículas de la segunda fase se alargan en la dirección del trabajo.

Ejemplo 8-6 *Diseño de un proceso para producir una tira de cobre*

Se desea producir una tira de cobre de 1 mm de grosor y 60 mm de ancho que tenga por lo menos una resistencia a la fluencia de 413.7 MPa y un mínimo de elongación de 5%. Sólo se pueden adquirir tiras de 60 mm de ancho en grosores de 50 mm. Diseñe un proceso para lograr el producto que se necesita, pero en menos etapas de las que se requieren en el ejemplo 8-5.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 8-5 se empleó una serie de ciclos de trabajo en frío-recocido para obtener el grosor que se requería. Se pueden reducir las etapas por medio del laminado en caliente al grosor intermedio que se pide:

$$\%\,\text{TC} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0}\right] \times 100 = \left[\frac{5\text{ cm} - 0.182\text{ cm}}{5\text{ cm}}\right] \times 100 = 96.4\%$$

$$\%\,\text{TC} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0}\right] \times 100 = \left[\frac{5\text{ cm} - 0.167\text{ cm}}{5\text{ cm}}\right] \times 100 = 96.7\%$$

Observe que las fórmulas del trabajo en caliente y en frío son las mismas. Puesto que la recristalización ocurre de forma simultánea con el trabajo en caliente, se pueden obtener estas grandes deformaciones y no se requiere un tratamiento de recocido por separado. Por lo tanto, el diseño podría ser

1. Trabajar en caliente a 96.4% la tira de 50 mm al grosor intermedio de 1.82 mm.
2. Trabajar en frío a 45% de 1.82 mm a la dimensión final de 1 mm. Este diseño da las dimensiones y las propiedades correctas.

Acabado superficial y precisión dimensional

Por lo general, el acabado superficial que se forma durante el trabajo en caliente es más deficiente que el que se logra por medio del trabajo en frío. Con frecuencia, el oxígeno reacciona con el metal de la superficie para formar óxidos, los cuales son forzados en la superficie durante la formación. Asimismo, los aceros y otros metales trabajados en caliente son sometidos a un tratamiento de "desoxidación" en el que se emplean ácidos para disolver el nivel de óxido. En algunos metales, como el tungsteno y el berilio, el trabajo en caliente debe realizarse en una atmósfera protectora para prevenir la oxidación. Observe que el proceso de formación que se lleva a cabo con materiales que contienen Be requiere medidas protectoras, dado que la inhalación de los materiales que contienen este elemento es tóxica.

La precisión dimensional también es difícil de controlar durante el trabajo en caliente. Debe considerarse una deformación elástica mayor, dado que el módulo de elasticidad es menor a las temperaturas del trabajo en caliente que a las temperaturas de trabajo en frío. Además, el metal se contrae a medida que se enfría de la temperatura de trabajo en caliente. La combinación de deformación elástica y contracción térmica requiere que la pieza se haga de un tamaño mayor durante la deformación; los moldes de formación deben diseñarse con cuidado, y es necesario controlar con precisión la temperatura si se deben obtener dimensiones exactas.

Resumen

- Las propiedades de los materiales metálicos puede controlarse combinando deformación plástica y tratamientos térmicos.
- Cuando se deforma un material metálico por medio de trabajo en frío, ocurre un endurecimiento por deformación a medida que se introducen dislocaciones adicionales en la estructura. De esta

manera pueden obtenerse incrementos muy grandes de la resistencia. La ductilidad del material metálico endurecido por deformación se reduce.

- El endurecimiento por deformación, además de incrementar la resistencia y la dureza, incrementa los esfuerzos residuales, produce un comportamiento anisotrópico y reduce la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión.
- La cantidad de endurecimiento por deformación es limitada, debido a la disminución simultánea de la ductilidad; por lo general, los metales CCCa tienen la mejor respuesta al endurecimiento por medio de trabajo en frío.
- El trefilado de alambre, el estampado, el laminado y la extrusión son algunos ejemplos de métodos de fabricación para moldear materiales metálicos. Algunos de los principios fundamentales de estos procesos también pueden utilizarse para fabricar materiales poliméricos.
- El mecanismo de endurecimiento por deformación no es eficaz a altas temperaturas, debido a que los efectos del trabajo en frío son eliminados por la recristalización.
- El recocido de materiales metálicos es un tratamiento térmico diseñado para eliminar todos, o una parte de, los efectos del endurecimiento por deformación. El proceso de recocido puede involucrar hasta tres etapas.
- La recuperación, que ocurre a temperaturas bajas, elimina los esfuerzos residuales y restaura la conductividad eléctrica sin reducir la resistencia. El "recocido de alivio de esfuerzo" se refiere a esta recuperación.
- La recristalización ocurre a temperaturas más altas y elimina casi todos los efectos del endurecimiento por deformación. La densidad de las dislocaciones disminuye drásticamente durante la recristalización a medida que los nuevos granos forman núcleos y crecen.
- El crecimiento de granos, que por lo general debe evitarse, ocurre a temperaturas aún más altas. En los materiales metálicos trabajados en frío, el crecimiento de los granos sigue después de la recuperación y la recristalización. En los materiales cerámicos, el crecimiento de los granos puede ocurrir debido a las temperaturas altas o a la presencia de una fase líquida durante la sinterización.
- El trabajo en caliente combina en una sola etapa la deformación plástica y el recocido, lo que permite grandes cantidades de deformación plástica sin volver quebradizo el material.
- El recocido de vidrios permite eliminar los esfuerzos que se desarrollan durante el enfriamiento. El templado térmico de vidrios es un tratamiento térmico en el que el enfriamiento rápido de la superficie del vidrio genera de manera deliberada un esfuerzo de compresión en la superficie. Se usan vidrios templados o laminados en aplicaciones donde la seguridad es importante.
- Mediante el granallado pueden introducirse esfuerzos residuales de compresión en los materiales metálicos. Este tratamiento permite un incremento de la vida de fatiga.

Glosario

Análisis de figura de polo Técnica especializada que se basa en la difracción de rayos X, utilizada para determinar la orientación preferida de las películas delgadas, hojas o cristales sencillos.

Efecto Bauschinger Material previamente deformado de manera plástica bajo tensión, que muestra una disminución del esfuerzo de flujo bajo compresión.

Endurecimiento por deformación Endurecimiento de un material, que se logra mediante el incremento del número de dislocaciones por deformación. También se lo conoce como "endurecimiento por trabajo".

Endurecimiento por textura Incremento de la resistencia a la fluencia de un material como resultado de la textura cristalográfica preferida.

Esfuerzos residuales Esfuerzos a los que se somete a un material durante el procesamiento. Pueden originarse como resultado del trabajo en frío o de la expansión y contracción térmica diferencial.

Estructura subgranular poligonizada Arreglo de las dislocaciones que se fo rma durante la etapa de recuperación del recocimiento en la preparación para formar nuevos límites de grano durante la recristalización.

Exponente del endurecimiento por deformación Parámetro que describe el efecto que tiene la deformación sobre la resistencia resultante del material. Un material con un alto coeficiente de endurecimiento por deformación logra una resistencia alta con sólo cantidades pequeñas de deformación.

Extrusión Técnica de procesamiento de deformación en la que se empuja un material a través de una abertura en un dado. Se utiliza para trabajar materiales metálicos y poliméricos.

Fuente de Frank-Read Dislocación fija que, bajo un esfuerzo aplicado, produce dislocaciones adicionales. Este mecanismo es al menos parcialmente responsable del endurecimiento por deformación.

Granallado Introducción de esfuerzos residuales de compresión en la superficie de una pieza mediante el bombardeo de la superficie con granalla de acero para mejorar el desempeño general del material.

Microscopía de orientación Técnica especializada, con frecuencia basada en la microscopía electrónica de barrido, que se utiliza para determinar la orientación cristalográfica de los distintos granos de una muestra policristalina.

Procesamiento de deformación Técnicas para fabricar materiales metálicos y otros por medio de procesos como el laminado, la extrusión, el trefilado, etcétera.

Procesamiento termomecánico Proceso involucrado en la fabricación de componentes metálicos mediante deformación mecánica y diversos tratamientos térmicos.

Rapidez de deformación Velocidad a la que se deforma un material.

Recocido En el contexto de los metales, el recocido es un tratamiento térmico que se utiliza para eliminar parte de o todos los efectos del trabajo en frío. En el caso de los vidrios, el recocido es un tratamiento térmico que elimina los esfuerzos inducidos térmicamente.

Recocido de alivio de esfuerzo Etapa de recuperación del tratamiento térmico de recocido durante la cual se liberan los esfuerzos residuales sin alterar la resistencia y la ductilidad del material.

Recristalización Tratamiento térmico de recocido a temperatura media diseñado para eliminar todos los efectos del endurecimiento por deformación que se producen durante el trabajo en frío.

Recuperación Tratamiento térmico de recocido a baja temperatura diseñado para eliminar los esfuerzos residuales introducidos durante la deformación sin reducir la resistencia del material trabajado en frío. Este procedimiento es el mismo que el de recocido de alivio de esfuerzo.

Sensibilidad a la rapidez de deformación Velocidad a la que el esfuerzo cambia como una función de la rapidez de deformación. Un material puede comportarse de manera muy distinta si se prensa lentamente en una forma en vez de transformarse con rapidez por una carga de impacto.

Temperatura de recristalización Temperatura sobre la que emergen nuevos granos en esencia libres de dislocaciones a partir de un material que se trabajó previamente en frío. Esta depende de la extensión del trabajo en frío, del tiempo del tratamiento térmico, etc., por lo que no es una temperatura fija.

Templado En el contexto de la fabricación de vidrios, el templado se refiere a un tratamiento térmico que genera un esfuerzo de compresión sobre la superficie de un vidrio. Esta capa de esfuerzo de compresión otorga mayor seguridad al vidrio templado. En el contexto del procesamiento de materiales metálicos, el templado es un tratamiento térmico que se utiliza para ablandar el material e incrementar su tenacidad.

Termoplásticos Clase de polímeros que consiste en moléculas grandes parecidas a una masa de espagueti enredada (por ejemplo, el polietileno, el nailon, el PET, etcétera).

Textura fibrosa Orientación preferida de los granos que se obtiene durante el proceso de trefilado de alambres. Ciertas direcciones cristalográficas en cada grano se alinean con la dirección del trefilado, lo que provoca un comportamiento anisotrópico.

Textura laminar Orientación preferida de los granos que se acomodan durante el procesamiento de laminado. Ciertas direcciones cristalográficas se alinean con la dirección de laminado y ciertos planos cristalográficos preferidos se vuelven paralelos a la superficie de la hoja.

Trabajo en caliente Deformación de un metal por encima de la temperatura de recristalización. Durante el trabajo en caliente, sólo cambia la forma del metal; la resistencia permanece relativamente sin cambios, debido a que no ocurre endurecimiento por deformación.

Trabajo en frío Deformación de un metal que ocurre por debajo de la temperatura de recristalización. Durante el trabajo en frío, el número de dislocaciones aumenta, lo que ocasiona que el metal se endurezca y cambie de forma.

Trabajo en tibio Término que se utiliza para indicar el procesamiento de materiales metálicos en un intervalo de temperatura entre las que definen el trabajo en frío y en caliente (por lo general, una temperatura entre 0.3 y 0.6 de la temperatura de fusión en K).

Trefilado Técnica de procesamiento de deformación en la que se jala un material a través de una abertura en un dado (por ejemplo, el trefilado de alambres).

Vidrio laminado de seguridad Dos piezas de vidrio recocido se mantienen unidas entre sí por medio de un plástico, como el butiral de polivinilo (PVB). Este tipo de vidrio puede usarse en los parabrisas de los automóviles.

Vidrio recocido Vidrio que ha sido tratado por medio del calentamiento sobre la temperatura del punto de recocido (donde la viscosidad del vidrio llega a 10^{12} Pa · s) y después se enfría lentamente para minimizar o eliminar los esfuerzos residuales.

Vidrio templado Vidrio, sobre todo para aplicaciones donde la seguridad es particularmente importante, que se obtiene por medio del tratamiento térmico y enfriamiento rápido o mediante el intercambio químico de iones. El templado genera un esfuerzo de compresión neto en la superficie del vidrio.

Zona afectada por el calor (ZAC) Volumen del material adyacente a una soldadura que se calienta durante el proceso de soldadura por encima de alguna temperatura crítica a la que ocurre un cambio en la estructura, como el crecimiento de granos o la recristalización.

Problemas

Sección 8-1 Relación del trabajo en frío con la curva esfuerzo-deformación

8-1 Con base en un diagrama de esfuerzo-deformación, explique lo que significa el término "endurecimiento por deformación".

8-2 ¿A qué se refiere el término "recuperación elástica"? ¿Cuál es la importancia de este término desde el punto de vista de la fabricación?

8-3 ¿A qué se refiere el término "efecto Bauschinger"?

8-4 ¿Qué técnicas de fabricación se usan en el proceso de trabajo en frío?

8-5 ¿Cuál es la diferencia entre extrusión y trefilado?

8-6 Considere las curvas de esfuerzo-deformación a la tensión en la figura 8-20 etiquetada 1 y 2 y responda las siguientes preguntas. Estas curvas son típicas de metales. Considere cada inciso como una pregunta por separado que no tiene relación con los incisos anteriores de la pregunta.

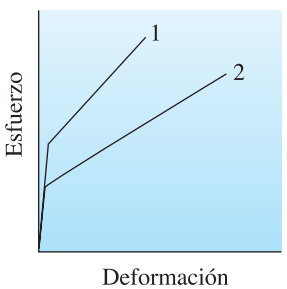


Figura 8-20 Curvas de esfuerzo-deformación (problema 8-6).

a) ¿Qué material tiene el mayor exponente de endurecimiento por trabajo? ¿Cómo lo sabe?

b) Las muestras 1 y 2 son idénticas a excepción de que se probaron a distintas velocidades de deformación. ¿Qué muestra se probó a la mayor velocidad de deformación? ¿Cómo lo sabe?

c) Suponga que las dos curvas de esfuerzo-deformación representan pruebas sucesivas de la misma muestra. La muestra se cargó, después se descargó antes de que comenzara el rebajo y después se volvió a cargar. ¿Qué muestra representa la primera prueba: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?

8-7 La figura 8-21 es una gráfica del esfuerzo verdadero en función de la deformación verdadera de un metal. En el caso de los esfuerzos impuestos totales de $\varepsilon = 0.1, 0.2, 0.3$ y 0.4, determine las componentes elástica y plástica de la deformación. El módulo de elasticidad del metal es de 100 GPa.

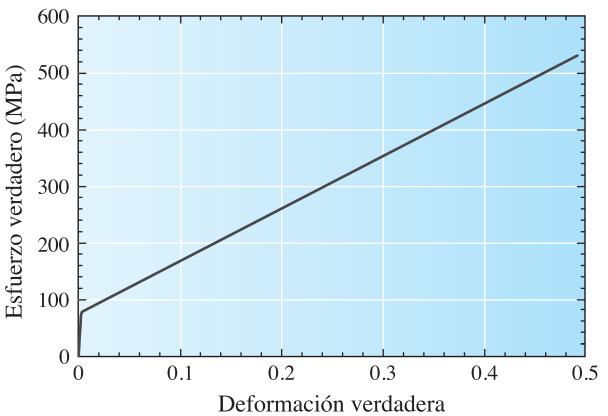


Figura 8-21 Curva del esfuerzo verdadero en función de la deformación verdadera de un metal (problema 8-7).

8-8 Defina los siguientes términos: exponente del endurecimiento por deformación (n) y sensibilidad a la rapidez de deformación (m). Utilice las ecuaciones apropiadas.

8-9 Una muestra de cobre recocido experimenta una deformación verdadera de 0.07 provocada por un esfuerzo verdadero de 164 MPa. Si esta deformación ocurre en la región de deformación plástica y el exponente de endurecimiento es de 0.44, ¿cuál sería el coeficiente de endurecimiento?

8-10 Una barra metálica de 12.83 mm de diámetro con una longitud calibrada l_0 de 50.8 mm se sometió a una prueba de tensión. Se realizaron las siguientes mediciones en la región plástica:

Fuerza (kN)	Cambio en la longitud calibrada (mm)(Δl)	Diámetro (mm)
122.3	5.342	12.19
120.1	11.25	11.60
114.3	17.77	11.03

Determine el exponente del endurecimiento por deformación del metal. ¿Es más probable que el metal sea CCCa, CCCu o CH? Explique su respuesta.

8-11 Una barra metálica de 13.3 mm de diámetro con una longitud calibrada l_0 de 30 mm se sometió a una prueba de tensión. Se realizaron las siguientes mediciones:

Fuerza (N)	Cambio en la longitud calibrada (mm)	Diámetro (mm)
16,240	6.642	12.028
19,066	14.754	10.884
19,273	24.663	9.848

Determine el coeficiente del endurecimiento por deformación del metal. ¿Es más probable que el metal sea CCCa, CCCu o CH? Explique su respuesta.

8-12 En la figura 8-22 se muestra una curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera. Determine el exponente de endurecimiento por deformación del metal.

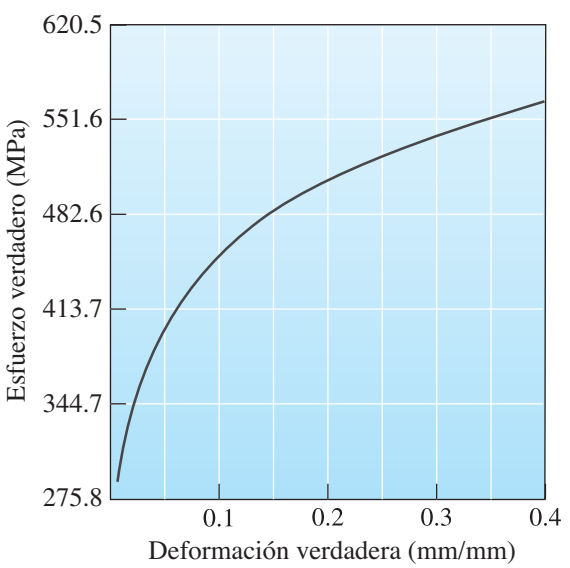


Figura 8-22 Curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera (problema 8-12).

8-13 La figura 8-23 muestra una gráfica del logaritmo natural del esfuerzo verdadero en función del logaritmo natural de la deformación verdadera de una aleación de Cu-30% Zn probada en tensión. Sólo se muestra la parte plástica de la curva de esfuerzo-deformación. Determine el coeficiente de resistencia K y el exponente del endurecimiento por trabajo *n*.

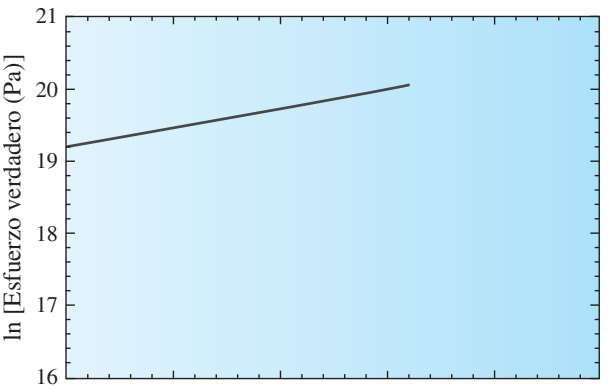


Figura 8-23 Logaritmo natural del esfuerzo verdadero en función del logaritmo natural de la deformación verdadera de una muestra de Cu-30% Zn probada en tensión.

8-14 Una barra de tensión de aleación de Cu-30% Zn tiene un coeficiente del endurecimiento por deformación de 0.50. La barra, que tiene un diámetro inicial de 10 mm y una longitud calibrada inicial de 30 mm, falla a un esfuerzo ingenieril de 120 MPa. Después de la fractura, la longitud calibrada es de 35 mm y el diámetro es de 9.26 mm. No se presenta estricción. Calcule el esfuerzo verdadero cuando la deformación verdadera es de 0.05 m/m.

8-15 ¿Qué significa un exponente de endurecimiento por deformación de cero en términos matemáticos y prácticos?

Sección 8-2 Mecanismos del endurecimiento por deformación

8-16 Explique por qué muchos materiales metálicos exhiben endurecimiento por deformación.

8-17 ¿El mecanismo del endurecimiento por deformación depende del tamaño de los granos? ¿Depende de la densidad de las dislocaciones?

8-18 Compare y contraste el endurecimiento por deformación con el endurecimiento por tamaño de los granos. ¿Qué provoca la resistencia al movimiento de las dislocaciones en cada uno de estos mecanismos?

8-19 Por lo general, el endurecimiento por deformación no se considera en el caso de los materiales cerámicos. Explique las razones de ello.

8-20 Los polímeros termoplásticos como el polietileno muestran un incremento de la resistencia cuando se sujetan a un esfuerzo. Explique cómo ocurre este fortalecimiento.

8-21 Las botellas de bebidas carbonatadas se fabrican de plástico PET. Explique cómo y por qué la cristalización inducida por esfuerzo incrementa la resistencia de las botellas de PET fabricadas

por medio del proceso de soplado-estiramiento (vea los capítulos 3 y 5).

Sección 8-3 Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío

8-22 Escriba la ecuación que define el porcentaje de trabajo en frío. Explique el significado de cada término.

8-23 Una placa de cobre de 6.35 mm de grosor se va a trabajar en frío a 63%. Determine el grosor final.

8-24 Una barra de cobre de 6.35 mm de diámetro se va a trabajar en frío a 63% en tensión. Encuentre el diámetro final.

8-25 Una barra de cobre de 50.8 mm de diámetro se reduce a 38.1 mm de diámetro, después se reduce de nuevo hasta un diámetro final de 25.4 mm. En un segundo caso, la barra de 50.8 mm de diámetro se reduce en una etapa de un diámetro de 50.8 mm a uno de 25.4 mm. Calcule el porcentaje de TF en ambos casos.

8-26 Una barra de acero de 25 mm de diámetro se extruye en frío primero a 22 mm y después a un diámetro final de 20 mm. Determine *a*) la cantidad de trabajo en frío en cada etapa y *b*) compare la suma de cantidades de trabajo en frío de las etapas con un proceso de trabajo en frío en donde se pasa de 25 mm a 20 mm directamente. (Vea el siguiente problema para comprender su solución).

8-27 Si la cantidad de extrusión del problema anterior se expresara como deformación verdadera *a*) determine la deformación verdadera en cada paso de extrusión y *b*) compare la suma de deformaciones verdaderas de las etapas con la deformación verdadera de 25 mm a 20 mm.

8-28 Un alambre de cobre puro de 2 mm de diámetro se reduce a 1.75 mm con trabajo en frío. ¿Cuál es la resistencia a la tensión? (Vea la figura 8-6.)

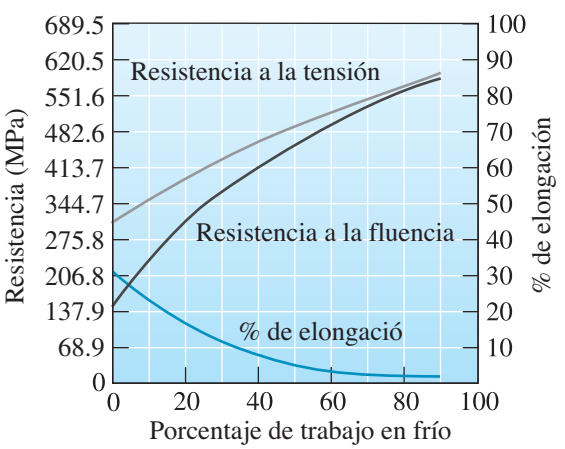


Figura 8-6 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre. (Repetida para el problema 8-28.)

8-29 Se reduce una placa de aluminio 3105 de 44.45 mm a 29.2 mm. Determine las propiedades finales de la placa. Observe que 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio. (Vea la figura 8-24.)

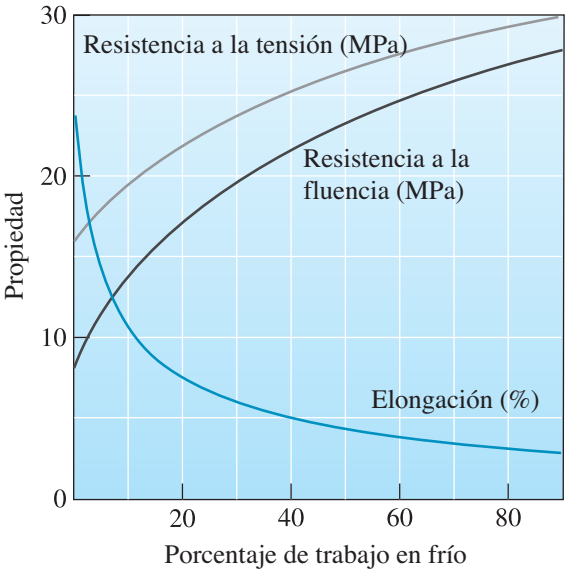


Figura 8-24 Efecto del porcentaje del trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de aluminio 3105 (problemas 8-29, 8-31, 8-37 y 8-54).

8-30 Una barra de latón de Cu-30% Zn se reduce de un diámetro de 25.4 mm a uno de 11.43 mm. Determine las propiedades finales de la barra. (Vea la figura 8-25.)

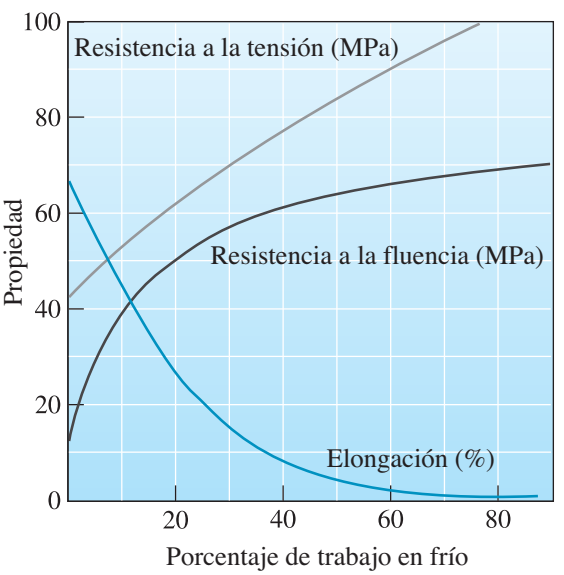


Figura 8-25 Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de un latón de Cu-30% Zn (problemas 8-30 y del 8-33 al 8-35).

8-31 Una barra de aluminio 3105 se reduce de un diámetro de 25.4 mm a uno de 20.32 mm, luego a

uno de 15.24 mm y finalmente a uno de 10.16 mm. Determine el porcentaje de TF y las propiedades después de cada etapa del proceso. Calcule el porcentaje total de trabajo en frío. Observe que 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio. (Vea la figura 8-24.)

8-32 Se desea que una barra de cobre tenga una resistencia a la tensión de por lo menos 483 MPa y un diámetro final de 9.525 mm. ¿Cuál es el diámetro mínimo de la barra original? (Vea la figura 8-6.)

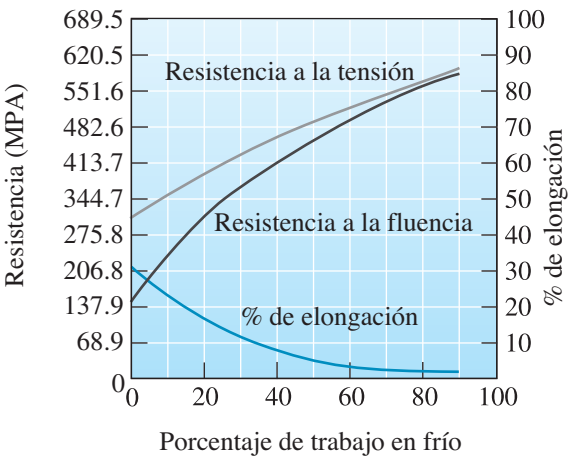


Figura 8-6 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre. (Repetida para los problemas 8-32, 8-56 y 8-82.)

8-33 Se desea que una placa de latón de Cu-30% Zn originalmente de 30.5 mm de grosor tenga una resistencia a la fluencia mayor a 345 MPa y un porcentaje de elongación de por lo menos 10%. ¿Qué intervalo de grosores finales debe obtenerse? (Vea la figura 8-25.)

8-34 Una placa laminada de Cu-30% en peso de Zn de 0.500 pulg de grosor tiene un porcentaje de elongación de 2%, tal como se recibe del proveedor. Las especificaciones deseadas para la hoja final son un grosor de 3.175 mm, una resistencia a la tensión mínima de 483 MPa y una elongación mínima de 7%. Suponga que el laminado se lleva a cabo para que el ancho de la hoja no cambie. Especifique cuáles serían los pasos del procedimiento, entre ellos, los tratamientos. (Vea la figura 8-25.)

8-35 Una pieza de latón de Cu-30% en peso de Zn se trabaja en frío, pero se desconoce a qué grado se ha llevado a cabo este trabajo. Las pruebas indican que la resistencia a la tensión es de 413.7 MPa, con una elongación de 30%. Determine la cantidad de trabajo en frío y la resistencia a la tensión del latón en la condición de recocido. (Vea la figura 8-25.)

8-36 Se desea que una hoja de cobre tenga por lo menos una resistencia a la fluencia de 345 MPa y una elongación de 10%, con un grosor final de 3.05 mm. ¿Qué intervalo del grosor original debe utilizarse? (Vea la figura 8-6.)

8-37 Una placa de aluminio 3105 trabajada en frío con anterioridad a 20% es de 50.8 mm de grosor. Después se trabaja en frío hasta 33.02 mm. Calcule el porcentaje total de trabajo en frío y determine las propiedades finales de la placa. (*Nota*: 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio.) (Vea la figura 8-24.)

8-38 Se debe cortar una tira de aluminio y litio (Al-Li) de 5.08 mm de grosor y 50.8 mm de ancho a partir de una hoja laminada, como se describe en la figura 8-9. La tira debe soportar una carga de 155.7 kN sin deformación plástica. Determine el intervalo de orientaciones a partir de las cuales debe cortarse la tira de la hoja laminada.

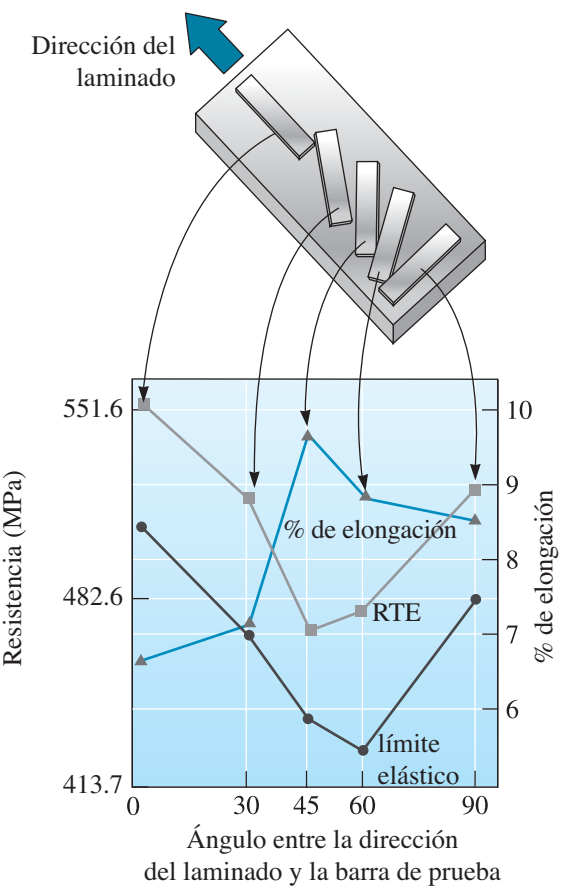


Figura 8-9 Comportamiento anisotrópico en una hoja laminada de un material de aluminio-litio que se usa en aplicaciones aeroespaciales. La representación relaciona la posición de las barras de tensión con las propiedades mecánicas que se obtienen. (Repetida para el problema 8-38.)

Sección 8-4 Microestructura, endurecimiento por textura y esfuerzos residuales

8-39 ¿La resistencia a la fluencia de los materiales metálicos depende de la textura cristalográfica desarrollada durante el trabajo en frío? Explique las causas de ello.

8-40 ¿El módulo de Young de un material depende de las direcciones cristalográficas en un material cristalino? Explique su respuesta.

8-41 ¿A qué se refieren los términos "textura fibrosa" y "textura laminar"?

8-42 Una de las desventajas del proceso de laminado en frío es la generación de esfuerzos residuales. Explique cómo se pueden eliminar los esfuerzos residuales de los materiales metálicos trabajados en frío.

8-43 ¿Qué es el granallado?

8-44 ¿Cuál es la diferencia entre el templado y el recocido de vidrios?

8-45 ¿En qué difiere el vidrio laminado de seguridad del vidrio templado? ¿Dónde se usa el vidrio laminado?

8-46 ¿Qué es el templado térmico? ¿En qué difiere del templado químico? Enuncie aplicaciones de los vidrios templados.

8-47 Explique los factores que afectan la resistencia de la mayoría de los vidrios. Explique cómo la templadura térmica ayuda a incrementar la resistencia de los vidrios.

8-48 Los esfuerzos residuales no siempre son deseables. ¿Verdadero o falso? Explique.

Sección 8-5 Características del trabajo en frío

8-49 ¿Qué es el trabajo en frío? ¿Qué características tiene un material después de haber sido trabajado en frío?

8-50 El trabajo en frío no puede utilizarse como un mecanismo de endurecimiento para los materiales que serán sometidos a altas temperaturas durante su uso. Explique por qué.

8-51 Las latas de aluminio que se fabrican por medio del embutido profundo obtienen una resistencia considerable durante su fabricación. Explique por qué.

8-52 Los metales, como el magnesio, no pueden endurecerse de manera eficaz mediante el trabajo en frío. Explique las causas de ello.

8-53 Se desea trefilar un alambre de cobre de 7.62 mm de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia de 138 MPa en un alambre de 6.35 mm de diámetro.

a) Encuentre la fuerza de trefilado, suponiendo que no hay fricción;

b) ¿El alambre trefilado se romperá durante el proceso? Demuestre por qué. (Vea la figura 8-6.)

8-54 Se debe trefilar un alambre de aluminio 3105 para obtener un alambre de 1 mm de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia de 138 MPa. Observe que 3105 indica una composición especial de aleación de aluminio.

a) Encuentre el diámetro original del alambre.

b) Calcule la fuerza de trefilado que se requiere.

c) Determine si el alambre trefilado se romperá durante el proceso. (Vea la figura 8-24.)

8-55 Se mide la conductividad eléctrica de un alambre de Cu-40% peso en Zn. ¿Qué tan menos conductivo es que un alambre de cobre puro trabajado en frío a 60%? (Vea la figura 8-11.)

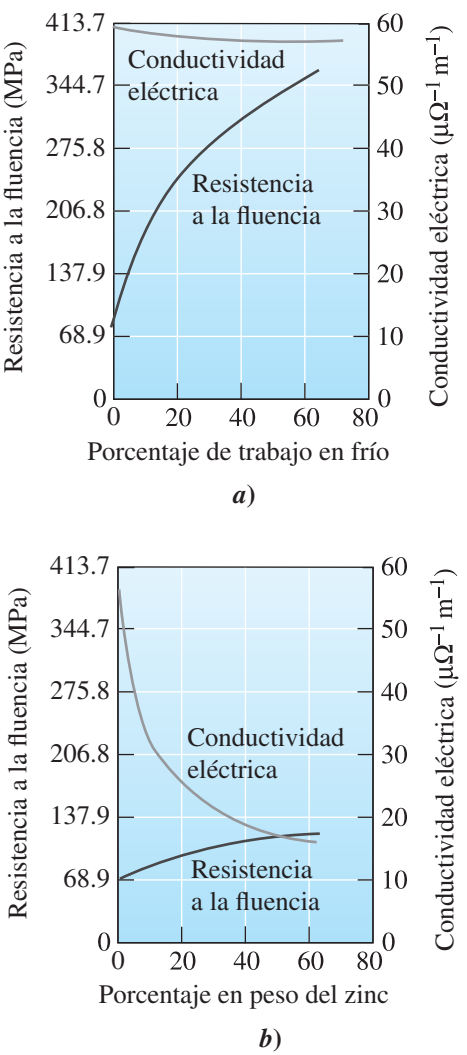


Figura 8-11 Comparación del endurecimiento del cobre por medio de *a*) trabajo en frío y *b*) aleación con zinc. Observe que el trabajo en frío produce un endurecimiento mayor, pero tiene poco efecto sobre la conductividad eléctrica. (Repetida para el problema 8-55.)

Sección 8-6 Las tres etapas del recocido

8-56 Explique las tres etapas del recocido de los materiales metálicos.

8-57 ¿Cuál es la fuerza motriz de la recristalización?

8-58 En el estado de recuperación, los esfuerzos residuales se reducen; sin embargo, la resistencia del material metálico permanece sin cambio. Explique por qué.

8-59 ¿Cuál es la fuerza motriz del crecimiento de granos?

8-60 Enfoque el crecimiento de granos como la tercera etapa del recocido, y explique su efecto sobre la resistencia de los materiales metálicos.

8-61 ¿Por qué el crecimiento de granos por lo general no es deseable? Cite un ejemplo donde el crecimiento de granos sea en realidad útil.

8-62 ¿Cuáles son las diferentes maneras en las que se puede encontrar el crecimiento de granos en las cerámicas?

8-63 ¿El recocido y la recuperación son siempre prerrequisitos del crecimiento de granos? Explique por qué.

8-64 Una aleación de titanio contiene una dispersión muy fina de partículas de Er_2O_3. ¿Cuál es el efecto de estas partículas sobre la temperatura del crecimiento de granos y el tamaño de granos a cualquier temperatura de recocido en particular? Explique su respuesta.

8-65 Explique por qué el filamento de tungsteno que se usa en las bombillas eléctricas incandescentes termina por fallar.

8-66 ¿Es posible obtener un monocristal a partir de un material inicialmente policristalino mediante procesos de trabajo en frío, recristalización y crecimiento de granos? Explique su razonamiento de forma completa.

8-67 Se desea una resistencia a la tensión no menor a 483 MPa y una elongación de 25% para una aleación de Cu-35% Zn. Si se trabaja en frío a 75% para darle la forma deseada, ¿cuánto deberá calentarse en el recocimiento para alcanzar estas propiedades? (Vea la figura 8-14.)

8-68 Se laminaron en frío muestras de latón en carrete (Cu-30% Zn) y después se recocieron por una hora. Se obtuvo la información que se muestra en la tabla de abajo.

Temperatura de recocido (°C)	Tamaño de grano (μm)	Resistencia a la fluencia (MPa)
400	15	159
500	23	138
600	53	124
700	140	62
800	505	48

a) Grafique la resistencia a la fluencia y el tamaño de los granos como una función de la temperatura de recocido en la misma gráfica. Utilice dos ejes verticales, uno para la resistencia a la fluencia y el otro para el tamaño de los granos.

b) Para cada temperatura, enuncie cuáles etapas del proceso de recocido ocurrieron. Justifique sus respuestas refiriéndose a las características de la gráfica.

8-69 La siguiente información se obtuvo cuando se recoció un metal trabajado en frío.

a) Calcule las temperaturas de recuperación, de recristalización y de crecimiento de granos.

b) Recomiende una temperatura adecuada para un tratamiento térmico de alivio de esfuerzo.

c) Recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente.

d) Calcule la temperatura de fusión de la aleación.

Temperatura de recocido (°C)	Conductividad eléctrica ($ohm^{-1} \cdot m^{-1}$)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Tamaño de grano (mm)
400	3.04×10^7	86	0.10
500	3.05×10^7	85	0.10
600	3.36×10^7	84	0.10
700	3.45×10^7	83	0.098
800	3.46×10^7	52	0.030
900	3.46×10^7	47	0.031
1000	3.47×10^7	44	0.070
1100	3.47×10^7	42	0.120

8-70 La siguiente información se obtuvo cuando se recoció un metal trabajado en frío:

a) Calcule las temperaturas de recuperación, de recristalización y de crecimiento de granos.

b) Recomiende una temperatura adecuada para obtener un alambre con una resistencia y una conductividad eléctrica altas.

Tamaño de la temperatura de recocido (°C)	Esfuerzos residuales (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Tamaño del grano (mm)
250	145	386	0.0762
275	145	386	0.0762
300	34.5	386	0.0762
325	0	386	0.0762
350	0	234	0.0254
375	0	207	0.0254
400	0	186	0.0889
425	0	172	0.1829

c) Recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente.
d) Calcule la temperatura de fusión de la aleación.

8-71 ¿A qué se refiere el término "recristalización"? Explique por qué la resistencia a la fluencia de un material metálico disminuye durante esta etapa del recocido.

Sección 8-7 Control del recocido

8-72 ¿En qué se distingue el trabajo en caliente del trabajo en frío de los materiales metálicos?

8-73 ¿Por qué la temperatura de recristalización no es una temperatura fija para un material dado?

8-74 ¿Por qué el incremento del tiempo de un tratamiento térmico significa que la recristalización ocurrirá a una temperatura más baja?

8-75 Dos hojas de acero se trabajaron en frío a 20 y 80%, respectivamente. ¿Cuál de ellas es más probable que tenga una temperatura de recristalización más baja? ¿Por qué?

8-76 Proporcione ejemplos de dos materiales metálicos para los cuales la deformación a temperatura ambiente significará "trabajo en caliente".

8-77 Proporcione ejemplos de dos materiales metálicos para los cuales la deformación mecánica a 900°C significará "trabajo en frío".

8-78 Grafique las temperaturas de recristalización en función de las temperaturas de fusión de la tabla 8-4. ¿Estas temperaturas son proporcionales? En caso afirmativo, ¿cuál sería la constante proporcional? En primer lugar, asegúrese de convertir las temperaturas a kelvin.

8-79 Añada una columna a la tabla 8-4 con el rango de temperaturas de trabajo en tibio. Recuerde convertir los grados a kelvin cuando realice sus cálculos.

Tabla 8-4 Temperaturas típicas de recristalización de algunos metales

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de recristalización (°C)
SN	232	−4
Pb	327	−4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(*Basado* en Structure and Properties of Engineering Materials, *de Brick, R.M y cols.: McGraw-Hill, 1977.*)

8-80 Considere las curvas de esfuerzo-deformación a la tensión en la figura 8-20 etiquetadas 1 y 2 y responda las siguientes preguntas. Estos diagramas son típicos de metales. Considere cada inciso como una pregunta independiente que no tiene relación con los incisos anteriores.

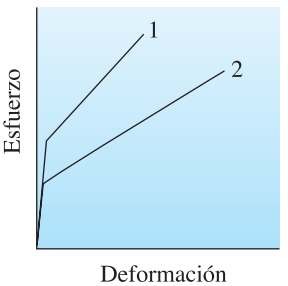


Figura 8-20 Curvas de esfuerzo deformación (problema 8-80).

a) ¿Cuál de los dos materiales representados por las muestras 1 y 2 puede laminarse en frío en mayor grado? ¿Cómo lo sabe?
b) Las muestras 1 y 2 tienen la misma composición y se procesaron de manera idéntica, a excepción de que una de ellas se trabajó en frío más que la otra. Las curvas de esfuerzo deformación se obtuvieron después que se trabajaron en frío las muestras. ¿Cuál muestra tiene la temperatura de recristalización más baja: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?
c) Las muestras 1 y 2 son idénticas excepto que se recocieron a temperaturas distintas por el mismo periodo. ¿Cuál muestra se recoció a la temperatura más alta: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?
d) Las muestras 1 y 2 son idénticas excepto que se recocieron a la misma temperatura por periodos distintos. ¿Cuál muestra se recoció por un periodo de tiempo menor: 1 o 2? ¿Cómo lo sabe?

Sección 8-8 Recocido y procesamiento de materiales

8-81 Se desea producir una placa de aluminio 3105 de 7.62 mm de grosor que tenga una resistencia a la tensión de al menos 172.4 MPa y un porcentaje de elongación de por lo menos 5%. El grosor original de la placa es de 76.2 mm. El trabajo en frío máximo en cada etapa es de 80%. Describa las etapas de trabajo en frío y de recocido que se requieren para fabricar este producto. Compare este proceso con lo que recomendaría si pudiera

realizar la deformación inicial por medio de trabajo en caliente. (Vea la figura 8-24.)

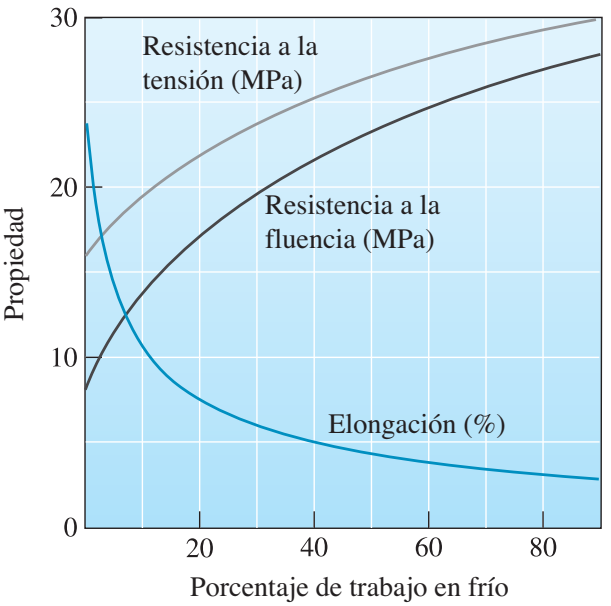


Figura 8-24 Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de aluminio 3105 (problema 8-81).

8-82 Se desea fabricar un alambre de cobre de 5.08 mm de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia mínima de 414 MPa y un porcentaje de elongación mínimo de 5%. El diámetro original de la barra es de 50.8 mm y el trabajo en frío máximo en cada etapa es de 80%. Describa una secuencia de etapas de trabajo en frío y recocido para fabricar este producto. Compare este proceso con lo que recomendaría si pudiera realizar la deformación inicial por medio de trabajo en caliente. (Vea la figura 8-6.)

8-83 ¿Qué es una zona afectada por el calor? ¿Por qué algunos procesos de soldadura generan una unión donde el material de la zona afectada por el calor es más débil que el metal base?

8-84 ¿Qué técnicas de soldadura pueden utilizarse para evitar la pérdida de resistencia del material en la zona afectada por el calor? Explique por qué estas técnicas son eficaces.

Sección 8-9 Trabajo en caliente

8-85 La cantidad de deformación plástica que puede desarrollarse durante el trabajo en caliente es casi ilimitada. Justifique este enunciado.

8-86 Compare y contraste el trabajo en caliente y el trabajo en frío.

Problemas de diseño

8-87 Diseñe, utilizando uno de los procesos que se explican en este capítulo, un método para producir cada uno de los siguientes productos. ¿El proceso incluye trabajo en caliente, trabajo en frío, recocido o alguna combinación de estos? Explique sus decisiones.

a) clips para papel;
b) vigas en I que se soldarán para producir una parte de un puente;
c) tubería de cobre que conectará una llave de agua al sistema principal de tuberías de cobre;
d) la cinta de acero en una cinta métrica, y
e) una cabeza para un martillo de carpintero formada a partir de una barra redonda.

8-88 Se planea unir dos hojas de cobre trabajado en frío por soldadura blanda. La soldadura involucra calentar el metal a una temperatura lo suficientemente alta para que se funda el material de aporte y se succione en la unión (capítulo 9). Diseñe un proceso de soldadura que no suavice al cobre. Explique. ¿Podría utilizarse temperaturas de soldadura más altas si el material de la hoja fuera una aleación de Cu-30% Zn? Explique.

8-89 Se desea producir un alambre de cobre de 1 mm de diámetro que tenga una resistencia a la fluencia mínima de 414 MPa y un porcentaje de elongación mínima de 5%. Se comienza con una barra de 20 mm de diámetro. Diseñe el proceso por medio del cual puede trefilarse el alambre. Incluya todos los detalles importantes y explique.

Problemas por computadora

8-90 *Diseño de un proceso de trefilado de alambre.* Edite un programa de cómputo que compute de manera eficaz la solución al ejemplo resuelto 8-4. El programa debe pedirle al usuario que determine el valor del diámetro final del alambre (por ejemplo, 2 mm). Asimismo, debe suponer un valor razonable del diámetro inicial (d_0) (por ejemplo, 4 mm) y calcular la extensión del trabajo en frío utilizando la fórmula adecuada. Suponga que el usuario tiene acceso a la curva de resistencia a la fluencia en función del porcentaje de trabajo en frío y se le pide que introduzca el valor de la resistencia a la fluencia del trabajo en frío a 0%. Utilice este valor para calcular las fuerzas necesarias para el trefilado y el esfuerzo que actúa sobre el alambre a medida que sale

del dado. El programa debe pedirle al usuario que proporcione el valor de la resistencia a la fluencia del alambre para la cantidad de trabajo calculada para el diámetro inicial supuesto y el diámetro final necesario. Como en el ejemplo 8-4, el programa debe repetir este cálculo hasta que obtenga un valor aceptable de d_0.

Problemas Knovel[MR]

K8-1 Un miembro de compresión cargado axialmente se forma en frío a partir de una placa de acero 1025 AISI. En la figura K8-1 se muestra una sección transversal del miembro. El metal de sus esquinas se fortaleció por trabajo en frío. Determine las resistencias última y a la fluencia del material antes de la formación; la resistencia a la fluencia del material en las esquinas de la sección después de la formación en frío; y la resistencia a la fluencia promedio de la sección, tomando en cuenta las porciones planas y las esquinas fortalecidas por el trabajo en frío. Suponga una sección compacta y un factor de reducción $\rho = 1.0$ (figura K8-1).

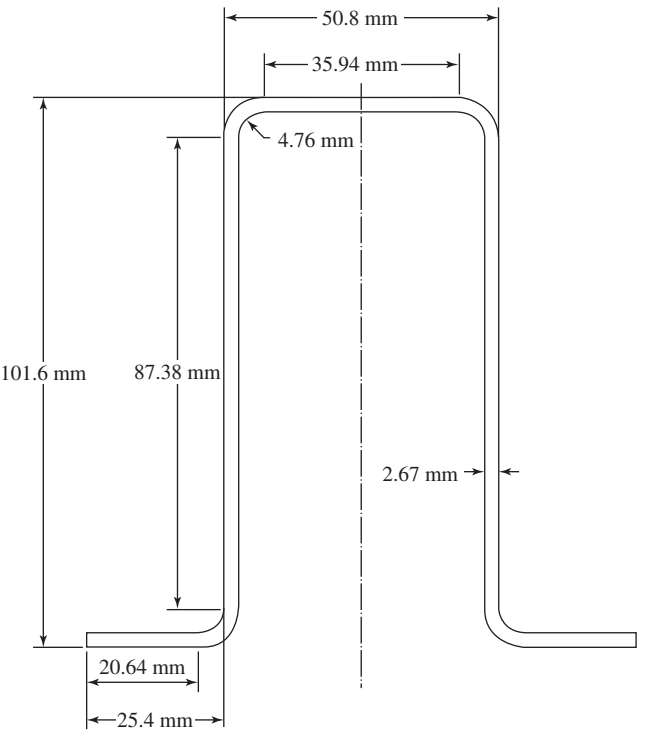
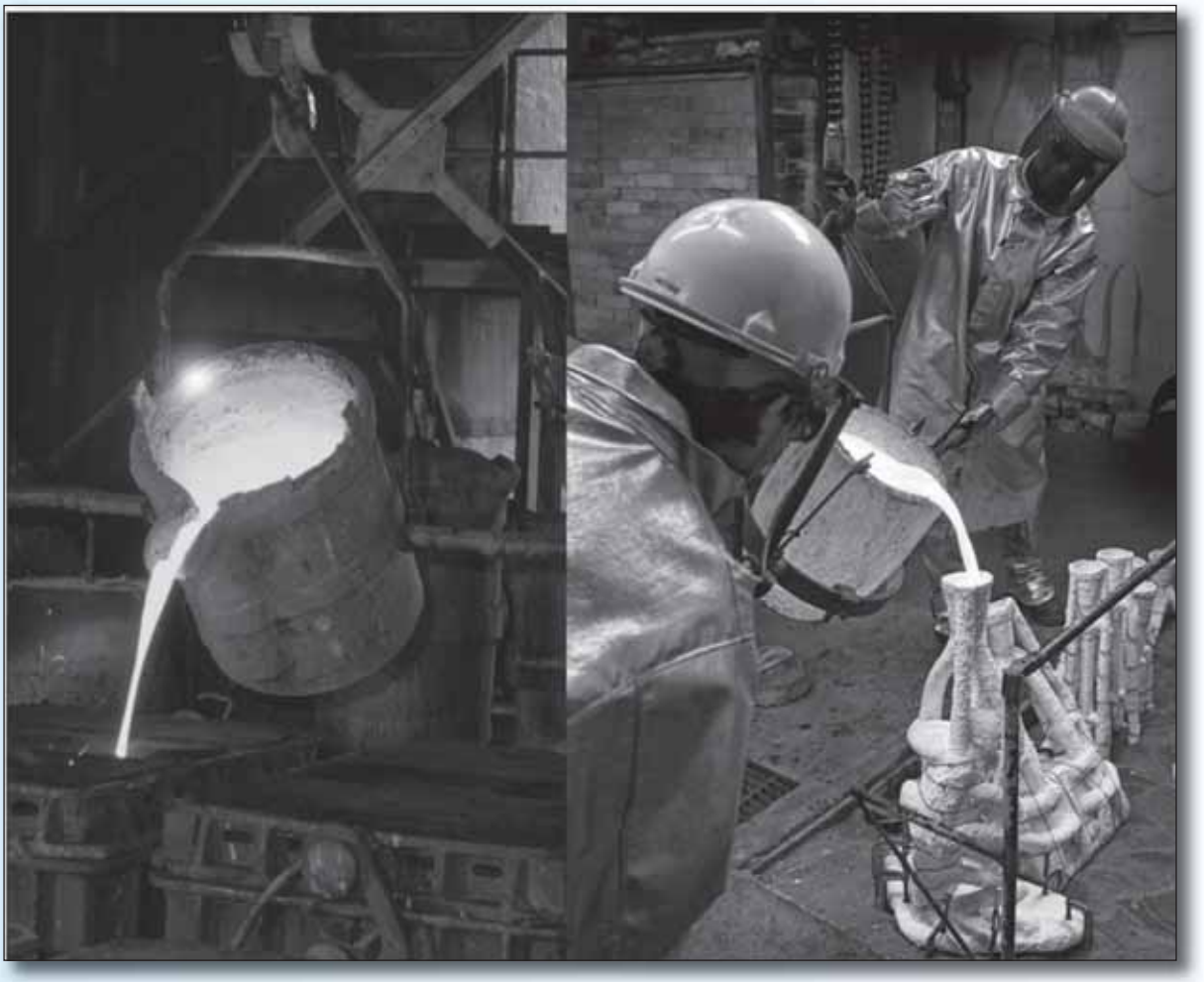


Figura K8-1 Sección transversal del miembro de compresión del problema K8-1.



La fotografía de la izquierda muestra un proceso de fundición conocido como moldeo en arena verde (© *Peter Bowater/Alamy*). La arena aglomerada con arcilla se comprime alrededor de un patrón en un molde de dos partes. El patrón se elimina, pero deja atrás una cavidad y el metal fundido se vierte en ella. Los núcleos de arena pueden producir cavidades internas en la fundición. Después de que el metal se solidifica, se elimina la arena para obtener la pieza. La fotografía de la derecha muestra un proceso conocido como fundición por revestimiento (© *Jim Powell/Alamy*). Cuando se emplea fundición por revestimiento o a la cera perdida, se prepara un patrón a partir de un material que se funde con facilidad como una cera. Después, el patrón se "recubre" con una lechada y se construye una estructura a su alrededor utilizando partículas. El patrón se elimina por medio de calor y se vierte en la cavidad el metal fundido. A diferencia de la fundición en arena, el patrón no es reutilizable. La fundición en arena y la que se efectúa por revestimiento son sólo dos de una amplia variedad de procesos de fundición.

CAPÍTULO

9

Principios de la solidificación

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Si el agua en realidad se "congela" a 0°C y "hierve" a 100°C?*
- *¿Si una aleación o un material termoplástico tienen una temperatura específica de fusión?*
- *¿Qué factores determinan la resistencia de un producto vaciado?*
- *¿Por qué la mayoría de los vidrios y vidrios-cerámicos se procesan por medio de fusión y vaciado?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Desarrollar la expresión que describe el cambio total de energía libre durante la solidificación y calcular el tamaño del radio crítico de la nucleación homogénea de un sólido proveniente de un líquido.
- Explicar por qué los líquidos suelen solidificarse por nucleación heterogénea.
- Describir los factores que influyen en los modos planares y dendríticos del crecimiento sólido a partir de un líquido.
- Calcular el tiempo de solidificación del vaciado con base en la regla de Chvorinov.
- Dibujar curvas de enfriamiento de metales puros que están bien inoculados y de aquellos que no lo están.
- Describir las estructuras y defectos que ocurren en el vaciado.
- Describir los procesos de vaciado que se emplean con mayor frecuencia en la solidificación.

De todas las técnicas de procesamiento que se emplean para fabricar materiales, la solidificación es quizá la más importante. Todos los materiales metálicos, al igual que varias cerámicas, vidrios inorgánicos y polímeros termoplásticos, son líquidos o están fundidos en algún punto durante el procesamiento. Al igual que el agua se congela y se transforma en hielo, los materiales fundidos se solidifican a medida que se enfrían por

debajo de su temperatura de solidificación. En el capítulo 3 se aprendió cómo se clasifican los materiales con base en su orden atómico, iónico o molecular. Durante la solidificación de materiales que se cristalizan, el arreglo atómico cambia de un orden de corto alcance (OCA) a un orden de largo alcance (OLA). La solidificación de materiales cristalinos se desarrolla en dos etapas. En la primera, se forman cristalitos ultrafinos, conocidos como núcleos de fase sólida, a partir del líquido. En la segunda, la cual puede superponerse con la primera, los cristalitos sólidos ultrafinos comienzan a crecer a medida que los átomos del líquido se unen a los núcleos hasta que no queda líquido. Algunos materiales, como los vidrios inorgánicos de silicato, se solidifican sin desarrollar un orden de largo alcance (es decir, permanecen amorfos). Muchos materiales poliméricos pueden desarrollar una cristalinidad parcial durante la solidificación o el procesamiento.

La solidificación de materiales metálicos, poliméricos y cerámicos es un proceso importante que se debe estudiar, debido a su efecto sobre las propiedades de los materiales involucrados. En este capítulo se estudiarán los principios de la solidificación como se aplican a los metales puros. En los capítulos siguientes se explicará la solidificación de aleaciones y materiales más complejos. Primero se explicará la importancia tecnológica de la solidificación y después se examinarán los mecanismos por medio de los cuales ésta ocurre. A este tema le sigue un examen de la microestructura de los materiales metálicos vaciados y su efecto sobre las propiedades mecánicas del material. También se examinará la función del vaciado como un proceso de moldeo de materiales. Se analizará cómo se emplean ciertas técnicas como la soldadura, la soldadura fuerte y la soldadura blanda para unir materiales metálicos. También se explicarán las aplicaciones del proceso de solidificación en el crecimiento de monocristales y la solidificación de vidrios y polímeros.

9-1 Importancia tecnológica

La capacidad para usar el calor para producir, derretir y colar metales como cobre, bronce y acero se considera una característica importante del desarrollo de la humanidad. El uso del fuego para convertir minerales de procedencia natural en metales y aleaciones condujo a la producción de herramientas y otros productos. En la actualidad, miles de años después, la **solidificación** aún se considera uno de los procesos de fabricación más importantes. Cada mes, en Estados Unidos se producen muchos millones de toneladas de acero, aleaciones de aluminio, cobre y zinc mediante el proceso de vaciado. Este proceso también se emplea para fabricar piezas específicas (por ejemplo, la aleación de aluminio para rines de automóviles). La industria también utiliza el proceso de solidificación como una etapa de **procesamiento primario** para producir bloques o lingotes (un vaciado sencillo y con frecuencia grande que después se procesa en formas útiles). Los lingotes o bloques se trabajan en caliente y en frío a través de etapas de **procesamiento secundario** para convertirlos en perfiles más útiles (es decir, hojas, alambres, barras, placas, etc.). La solidificación también se aplica cuando se unen materiales metálicos por medio de técnicas como la soldadura, la soldadura fuerte y la soldadura blanda.

La solidificación también se utiliza para procesar vidrios inorgánicos; por ejemplo, el vidrio de silicato se procesa a través del proceso de vidrio flotado. Las fibras ópticas de alta calidad y otros materiales, como las fibras de vidrio, también se producen a partir de la solidificación de vidrios fundidos. Durante la solidificación de los vidrios inorgánicos se producen materiales amorfos, es decir, no cristalinos. Cuando se fabrican vidrios-cerámicos, primero se moldean los materiales por medio del vaciado de los vidrios amorfos, y después se cristalizan utilizando un tratamiento térmico para incrementar su resistencia. Muchos materiales termoplásticos como el polietileno, el cloruro de polivinilo (PVC), el polipropileno y similares se procesan en formas útiles (es decir, fibras, tubos, botellas, juguetes, utensilios, etc.) a través de un proceso que involucra fundición y solidificación. Por lo tanto, la solidificación es una tecnología muy importante que se utiliza para controlar las propiedades de muchos productos derivados de la fundición, al igual que una herramienta para fabricar materiales modernos de ingeniería. En la siguiente sección, primero se explican los procesos de formación de núcleos (nucleación) y crecimiento.

9-2 Formación de núcleos

En el contexto de la solidificación, el término formación de núcleos (**nucleación**) se refiere a la constitución de los primeros nanocristalitos del material fundido. Por ejemplo, a medida que el agua comienza a congelarse, se forman nanocristalitos, conocidos como **núcleos**. En sentido amplio, el término formación de núcleos se refiere a la etapa de formación inicial de una fase a partir de otra. Cuando el vapor se condensa en líquido, a las gotas de tamaño a nanoescala del líquido que aparecen cuando comienza la condensación se les conoce como núcleos. Más adelante también se verá que existen varios sistemas en los que los núcleos de un sólido (α) se formarán a partir un segundo material sólido (β) (es decir, la transformación de fase α- a β). Lo interesante acerca de estas transformaciones es que, en la mayoría de los materiales de ingeniería, varias de ellas ocurren mientras el material está en estado sólido (es decir, no hay fusión involucrada). Por lo tanto, aunque se explica la formación de núcleos desde la perspectiva de la solidificación, es importante observar que el fenómeno de la formación de núcleos es general y está asociado con las transformaciones de fase.

Se espera que un material se solidifique cuando el líquido se enfría justo por debajo de su temperatura de solidificación (o fusión), debido a que la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es entonces menor que la energía del líquido. Esta diferencia de energía entre el líquido y el sólido es la energía libre por unidad de volumen ΔG_v, que es la fuerza motriz de la solidificación.

Sin embargo, cuando el sólido se forma se crea una interfase sólido-líquido [figura 9-1*a*)]. Una energía de superficie libre σ_{sl} está asociada con esta interfase. Por lo tanto, el cambio total en energía ΔG, que se muestra en la figura 9-1*b*), es

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma_{sl} \tag{9-1}$$

donde $\frac{4}{3}\pi r^3$ es el volumen de un sólido esférico de radio r, $4\pi r^2$ es el área de superficie de un sólido esférico, σ_{sl} es la energía libre de superficie de la interfase sólido-líquido (en este caso) y ΔG_v es el cambio de energía libre por unidad de volumen, el cual es negativo dado que la transformación de fase se supone termodinámicamente factible. Observe que σ_{sl} no es una función dependiente de r y se supone constante. Tiene unidades de energía por unidad de área. Por su parte, ΔG_v tampoco depende de r.

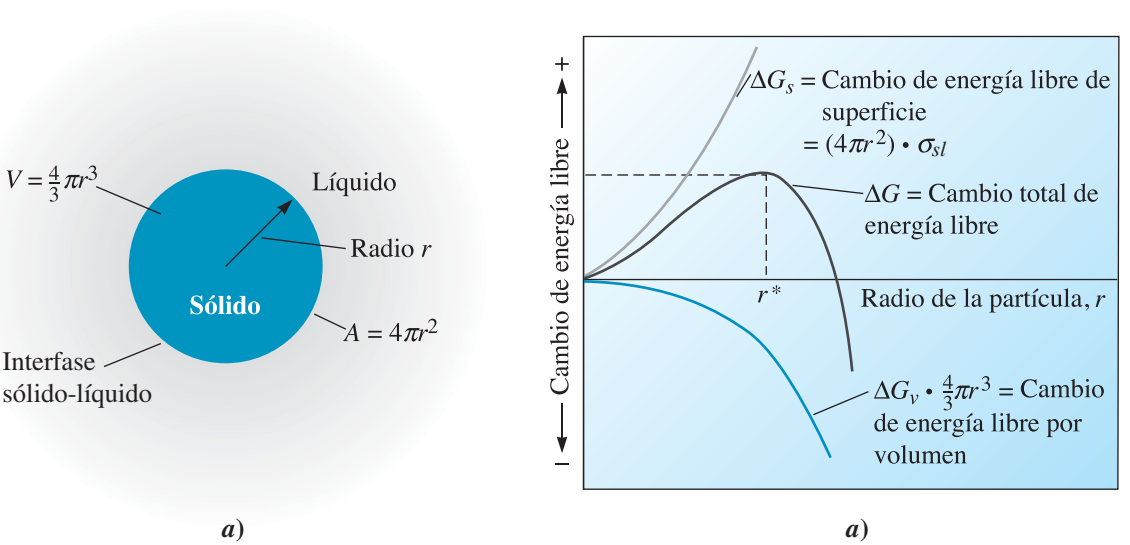


Figura 9-1 *a*) Se crea una interfase cuando se forma un sólido a partir del líquido. *b*) La energía libre total del sistema sólido-líquido cambia según el tamaño del sólido. Este es un embrión si su radio es menor que el radio crítico y es un núcleo si su radio es mayor que el radio crítico.

Un **embrión** es una partícula pequeña de sólido que se forma a partir del líquido a medida que los átomos se aglomeran entre sí. El embrión es inestable y puede crecer dentro de un núcleo estable o disolverse de nuevo.

En la figura 9-1*b*), la curva superior muestra la variación parabólica de la energía total de superficie ($4\pi r^2 \cdot \sigma_{sl}$). La curva inferior muestra el término del cambio de energía libre por volumen total $\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \Delta G_v\right)$. La curva del medio muestra la variación de ΔG. Representa la suma de las otras dos curvas dadas por la ecuación 9-1. A la temperatura a la que se predice que las fases sólida y líquida estarán en equilibrio termodinámico (es decir, a la temperatura de solidificación), la energía libre de la fase sólida y la de la fase líquida son iguales ($\Delta G_v = 0$), por lo que el cambio total de energía libre (ΔG) será positivo. Cuando el sólido es muy pequeño, con un radio menor que el **radio crítico** de la formación de núcleos (r^*) (figura 9-1*b*), un crecimiento posterior ocasiona que aumente la energía libre total. El radio crítico (r^*) es el tamaño mínimo de un cristal que debe formarse por medio de la aglomeración de átomos en el líquido antes de que la partícula sólida se estabilice y comience a crecer.

La formación de embriones es un proceso estadístico. Se forman y se vuelven a disolver muchos. Si se forma un embrión que tenga un radio mayor que r^*, un crecimiento posterior ocasiona que disminuya la energía libre total. El nuevo sólido es estable y sostenible, dado que ha ocurrido la formación de núcleos y comienza el crecimiento de la partícula sólida, a la cual se le llama ahora núcleo. A las temperaturas termodinámicas de fusión o solidificación, la probabilidad de formación de núcleos estables y sostenibles es extremadamente pequeña. Por lo tanto, la solidificación no comienza a la temperatura termodinámica de fusión o solidificación. Si la temperatura continúa disminuyendo por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, la fase líquida que debía haberse transformado en un sólido adquiere cada vez más inestabilidad termodinámica. Dado a que el líquido está por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, se lo considera subenfriado. El **subenfriamiento** (ΔT) es la diferencia entre la temperatura de solidificación de equilibrio y la temperatura real del líquido. A medida que aumenta la extensión del subenfriado, la fuerza motriz termodinámica de la formación de una fase sólida a partir del líquido supera la resistencia a crear una interfase sólido-líquido.

Este fenómeno puede observarse en muchas otras transformaciones de fase. Cuando una fase sólida (α) se transforma en otra fase sólida (β), el sistema tiene que enfriarse a una temperatura que esté por debajo de la temperatura termodinámica de transformación de fase (en la que las energías de las fases α y β son iguales). Cuando un líquido se transforma en vapor (es decir, el agua hierve), se crea una burbuja de vapor en el líquido. Sin embargo, para crear la transformación, ¡se necesita **sobrecalentar** el líquido por encima de su temperatura de ebullición! Por lo tanto, ¡se puede ver que los líquidos realmente no se congelan a su temperatura de congelación y que no hierven a su punto de ebullición! ¡Se necesita subenfriar el líquido para que se solidifique y sobrecalentarlo para que hierva!

Nucleación homogénea

A medida que un líquido se enfría a temperaturas por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, se combinan dos factores para favorecer la formación de núcleos. Primero, dado que los átomos están inmersos en un proceso de pérdida de su energía térmica, aumenta la probabilidad de que se formen aglomerados para formar embriones más grandes. Segundo, la mayor diferencia de energía libre por volumen entre el líquido y el sólido reduce el tamaño crítico (r^*) del núcleo. La **nucleación homogénea** ocurre cuando el subenfriamiento adquiere una magnitud lo suficientemente grande como para provocar la formación de un núcleo estable.

El tamaño del radio crítico r^* de la nucleación homogénea está dado por

$$r^* = \frac{2\sigma_{sl}T_f}{\Delta H_f\, \Delta T} \tag{9-2}$$

donde ΔH_f es el calor latente de fusión por unidad de volumen, T_f es la temperatura de solidificación de equilibrio en kelvins y $\Delta T = (T_f - T)$ es el subenfriamiento cuando la temperatura del líquido es T. El calor latente de fusión representa el calor perdido durante la transformación de líquido en sólido. A medida que aumenta el subenfriamiento, el radio crítico que se requiere para la formación

Tabla 9-1 Valores de la temperatura de solidificación, el calor latente de fusión, la energía de superficie y el subenfriamiento máximo de algunos materiales

	Temperatura de solidificación (T_f)	Calor de fusión (ΔH_f)	Energía interfacial sólido-líquido (σ_{sl})	Subenfriamiento común de la nucleación homogénea (ΔT)
Material	**(°C)**	**(MJ/m^3)**	**(J/m^2)**	**(°C)**
Ga	30	488	56×10^{-3}	76
Bi	271	543	54×10^{-3}	90
Pb	327	237	33×10^{-3}	80
Ag	962	965	126×10^{-3}	250
Cu	1085	1628	177×10^{-3}	236
Ni	1453	2756	255×10^{-3}	480
Fe	1538	1737	204×10^{-3}	420
NaCl	801			169
CsCl	645			152
H_2O	0			40

de núcleos disminuye. La tabla 9-1 presenta los valores de σ_{sl}, ΔH_f y los subenfriamientos comunes observados experimentalmente durante la nucleación homogénea.

El siguiente ejemplo muestra cómo se puede calcular el radio crítico del núcleo de la solidificación del cobre.

Ejemplo 9-1 *Cálculo del radio crítico de la solidificación del cobre*

Calcule el tamaño del radio crítico y el número de átomos del núcleo crítico cuando se forma cobre sólido por medio de nucleación homogénea. Comente el tamaño del núcleo y los supuestos que formuló mientras dedujo la ecuación del radio del núcleo.

SOLUCIÓN

A partir de la tabla 9-1 del Cu:

$$\Delta T = 236°\text{C}\ T_m = 1085 + 273 = 1358\ \text{K}$$
$$\Delta H_f = 1628\ \text{MJ/m}^3$$
$$\sigma_{sl} = 177 \times 10^{-3}\ \text{J/m}^2$$

Por lo tanto, r^* está dado por

$$r^* = \frac{2\sigma_{sl}T_f}{\Delta H_f \Delta T} = \frac{(2)(177 \times 10^{-3}\ \text{J/m}^2)(1358\ \text{K})}{(1628 \times 10^6\ \text{J/m}^3)(236\ \text{K})} = 1.2512 \times 10^{-9}\ \text{m} = 125\ \text{nm}$$

Observe que la diferencia de temperatura de 1°C es igual a un cambio de temperatura de 1 K, o $\Delta T = 236°\text{C} = 236\ \text{K}$.

El parámetro de red del cobre CCCa es $a_0 = 0.3615\ \text{nm} = 3.615 \times 10^{-10}\ \text{m}$. Por lo tanto, el volumen de la celda unitaria está dado por

$$V_{\text{celda unitaria}} = (a_0)^3 = (3.615 \times 10^{-10})^3 = 8.2054 \times 10^{-27}\ \text{m}^3$$

El volumen del radio crítico está dado por

$$V_{r^*} = \frac{4}{3}\pi(r^*)^3 = \left(\frac{4}{3}\pi\right)(1.2512 \times 10^{-9}\ \text{m})^3 = 8.2054 \times 10^{-27}\ \text{m}^3$$

El número de celdas unitarias en el núcleo crítico es

$$\frac{V_{r^*}}{V_{\text{celdas unitarias}}} = \frac{8.2054 \times 10^{-27}\ \text{m}^3}{4.7242 \times 10^{-29}\ \text{m}^3} = 174 \text{ celdas unitarias}$$

Dado que hay cuatro átomos en cada celda unitaria CCCa, el número de átomos en el núcleo crítico debe ser

$$(4 \text{ átomos/celda})(174 \text{ celdas/núcleos}) = 696 \text{ átomos/núcleos}$$

En estos tipos de cálculos se supone que un núcleo que está conformado a partir de sólo algunos cientos de átomos conservará propiedades similares a las de los materiales voluminosos. Esto no es estrictamente correcto, y como tal se considera una debilidad de la teoría clásica de la nucleación.

Nucleación heterogénea

A partir de la tabla 9-1, ¡puede verse que el agua no se solidificará en hielo a través de la nucleación homogénea hasta que se alcance una temperatura de −40°C (subenfriamiento de 40°C)! A excepción de experimentos controlados en el laboratorio, la nucleación homogénea nunca ocurre en los líquidos. En su lugar, las impurezas en contacto con el líquido, ya sean suspendidas en éste o en las paredes del contenedor, proporcionan una superficie en la que puede formarse el sólido (figura 9-2). Ahora, se logra un radio de curvatura mayor al radio crítico con muy poca superficie total entre el sólido y el líquido. Relativamente, unos cuantos átomos deben aglomerarse para producir una partícula sólida que tiene el radio de curvatura que se necesita. Se requiere mucho menos subenfriamiento para alcanzar el tamaño crítico, por lo que la nucleación ocurre de manera más rápida. A la nucleación en las superficies preexistentes se le conoce como **nucleación heterogénea**. Este proceso depende del ángulo de contacto (θ) de la fase de nucleación y la superficie en la que ésta ocurre. El mismo tipo de fenómeno se produce en las transformaciones de estado sólido.

Rapidez de nucleación

La *rapidez de nucleación* (el número de núcleos formados por unidad de tiempo) es una función de la temperatura. Por supuesto, antes de la solidificación no hay nucleación y, a temperaturas por encima del punto de congelación, la velocidad de nucleación es cero. A medida que disminuye la temperatura, aumenta la fuerza motriz de la nucleación; sin embargo, a medida que disminuye la temperatura, la difusión atómica se hace más lenta, lo que ralentiza el proceso de nucleación. Por lo tanto, una rapidez común de nucleación alcanza su máximo a alguna temperatura por debajo de la temperatura de transformación. Durante la nucleación heterogénea, su rapidez es determinada por la concentración de los agentes de nucleación. Cuando se consideran las velocidades de nucleación y crecimiento, se puede predecir la velocidad total de una transformación de fase.

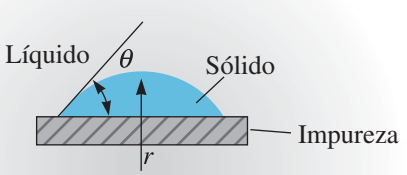


Figura 9-2 Un sólido que se forma sobre una impureza puede asumir el radio crítico con un aumento menor en la energía de superficie. Por lo tanto, la nucleación heterogénea puede ocurrir con subenfriamientos relativamente bajos.

9-3 Aplicaciones de la nucleación controlada

Endurecimiento por tamaño del grano

Cuando un metal vaciado se solidifica, las impurezas que subsisten en la fundición y en las paredes del molde en el que ocurre el proceso sirven como sitios de nucleación heterogénea. En algunas ocasiones, de manera intencional se introducen partículas de nucleación en el líquido. A tales prácticas se les llama **refinamiento de granos** o **inoculación**. A las sustancias químicas que se adicionan a los metales fundidos para promover la nucleación y, por lo tanto, un tamaño de grano más fino, se les conoce como refinadores de granos o **inoculadores**. Por ejemplo, se adiciona una combinación de 0.03% de titanio y 0.01% de boro a muchas aleaciones líquidas de aluminio. Se forman pequeñas partículas de un compuesto de aluminio y titanio (Al_3Ti) o de diboruro de titanio (TiB_2) que sirven como sitios para la nucleación heterogénea. El refinamiento de granos o inoculación produce un gran número de granos, cada uno de los cuales comienza a crecer a partir de un núcleo. El área mayor de límites de los granos proporciona un endurecimiento por tamaño del grano de los materiales metálicos. En el capítulo 4 se explicó este proceso por medio de la ecuación de Hall-Petch.

Endurecimiento de segunda fase

Al endurecimiento de materiales a través de precipitados ultrafinos se le conoce como **endurecimiento por dispersión** o **endurecimiento de segunda fase**; se utiliza de manera extensiva en el perfeccionamiento de las propiedades mecánicas de muchas aleaciones. Este proceso involucra **transformaciones de fase de estado sólido** (es decir, un sólido se transforma en otro). Con frecuencia, los límites de los granos, al igual que los defectos a nivel atómico dentro de los granos de la fase precursora (α), sirven como sitios de nucleación de la nucleación heterogénea de la nueva fase (β). Este fenómeno de nucleación desempeña una función crítica en los mecanismos de endurecimiento, tema que se explicará en los capítulos 10 y 11.

Vidrios

En el caso de velocidades de enfriamiento rápidas y/o fundiciones de viscosidad alta, se puede carecer de tiempo suficiente para que se formen y crezcan los núcleos. Cuando esto sucede, la estructura líquida se coloca en su sitio y se forma un sólido amorfo —o vítreo—. La estructura cristalina compleja de muchos materiales cerámicos y poliméricos previene la formación de núcleos de una estructura cristalina sólida, aun a bajas velocidades de enfriamiento. Algunas aleaciones con composiciones especiales poseen estructuras cristalinas lo suficientemente complejas, por lo que pueden formar materiales amorfos si se enfrían con rapidez a partir de la fundición. A estos materiales se les conoce como vidrios metálicos (capítulo 6). Por lo general, los buenos formadores de vidrios metálicos son aleaciones multicomponente, con frecuencia con grandes diferencias entre los tamaños atómicos de los constituyentes elementales. Esta complejidad limita las solubilidades sólidas de los elementos en las fases cristalinas, por lo que se requiere de grandes fluctuaciones químicas para formar los núcleos cristalinos de tamaño crítico. Inicialmente, los vidrios metálicos se producían por medio del **procesamiento de solidificación rápida** en el que se alcanzaban velocidades de enfriamiento de 10^6°C/s por medio de la formación de cintas delgadas metálicas continuas de alrededor de 38 μm de grosor. (El calor puede extraerse con rapidez de las cintas con una razón grande de área de superficie a volumen.)

En la actualidad se producen vidrios metálicos voluminosos con diámetros mayores de 12.7 mm aplicando diversas técnicas de procesamiento para composiciones que requieren velocidades de enfriamiento de sólo decenas de grados por segundo. Se han descubierto muchas composiciones de vidrios metálicos voluminosos, entre ellos el $Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$ y el $Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10.0}Be_{22.5}$. Gran cantidad de vidrios metálicos tienen resistencias en exceso de 1,724 MPa mientras muestran tenacidades a la fractura de más de 11 MPa$\sqrt{m}$. La resistencia a la corrosión, propiedades magnéticas y otras propiedades físicas excelentes hacen que estos materiales sean atractivos para una amplia variedad de aplicaciones.

Otros ejemplos de materiales que usan la formación de núcleos controlada son los vidrios de color y el **vidrio fotocrómico** (vidrio que cambia de color o de tinte cuando se lo expone a la luz del sol). En estos materiales que de otra manera serían amorfos, se nuclean de manera deliberada nanocristalitos de diferentes materiales. Los cristales son pequeños y, por lo tanto, no tornan opaco el vidrio. Tienen propiedades ópticas especiales que otorgan al vidrio un color brillante o fotocrómico.

Muchos materiales que se formaron a partir de una fase de vapor pueden enfriarse con rapidez, por lo que no se cristalizan y, por lo tanto, son amorfos (es decir, el silicio amorfo), lo que prueba que los materiales amorfos o no cristalinos no siempre se forman a partir de fundiciones.

Vidrios-cerámicos

El término **vidrio-cerámico** se refiere a los materiales de ingeniería que comienzan como vidrios amorfos y terminan como cerámicas cristalinas con un tamaño de grano ultrafino. Estos materiales son casi libres de porosidad, mecánicamente más resistentes y con frecuencia mucho más resistentes al impacto térmico. La formación de núcleos no ocurre con facilidad en los vidrios de silicato; sin embargo, se puede facilitar el proceso si se introducen agentes de formación de núcleos como la titania (TiO_2) y la zirconia (ZrO_2). Los vidrios-cerámicos ingenieriles aprovechan la facilidad con la que los vidrios pueden fundirse y formarse. Una vez formado el vidrio, se puede calentar para formar de manera deliberada cristales ultrafinos, materiales que tienen una tenacidad mecánica y una resistencia al impacto térmico considerables. La cristalización de los vidrios-cerámicos continúa hasta que todo el material se cristaliza (puede obtenerse hasta 99.9% de cristalinidad). Si el tamaño de los granos se mantiene pequeño (~ 50-100 nm), con frecuencia los vidrios-cerámicos pueden ser transparentes. Con el tiempo, todos los vidrios se cristalizarán como resultado de la exposición a temperaturas altas por largos periodos. Sin embargo, para producir un vidrio-cerámico la cristalización debe controlarse con cuidado.

9-4 Mecanismos de crecimiento

Una vez que se forman los núcleos sólidos de una fase (en un líquido u otra fase sólida), comienza a ocurrir el crecimiento a medida que se unen más átomos a la superficie sólida. Esta explicación se concentrará en la formación de núcleos y el crecimiento de cristales a partir del líquido. La naturaleza del crecimiento de los núcleos sólidos depende de cómo se eliminó el calor del material fundido. Por ejemplo, se considera el vaciado de un metal fundido en un molde. Se supone que se tiene un metal casi puro y no una aleación (ya que la solidificación de las aleaciones es diferente en que, en la mayoría de los casos, ocurre sobre un intervalo de temperaturas). En el proceso de solidificación deben eliminarse dos tipos de calores: el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. El **calor específico** es el calor que se requiere para cambiar la temperatura de una unidad de peso del material en un grado. El calor específico debe eliminarse primero, ya sea por radiación a la atmósfera circundante o por la conducción en el molde que lo rodea, hasta que el líquido se enfría a su temperatura de solidificación. Este proceso es simplemente un enfriamiento del líquido de una temperatura a otra en la que comienza la formación de núcleos.

Se sabe que para fundir un sólido se necesita suministrar calor. Por lo tanto, cuando se forman cristales sólidos a partir de un líquido, ¡se genera calor! Este tipo de calor es el **calor latente de fusión** (ΔH_f), el cual debe eliminarse de la interfase sólido-líquido antes de que se complete la solidificación. La manera en la que se elimina el calor latente de fusión determina el mecanismo de crecimiento del material y la estructura final de una pieza colada.

Crecimiento planar

Cuando se enfría un líquido bien inoculado (es decir, un líquido que contiene agentes de formación de núcleos) en condiciones de equilibrio, no es necesario de subenfriarlo, dado que puede ocurrir la nucleación heterogénea. Por ello, la temperatura del líquido más allá del **frente de solidificación** (es decir, la interfase sólido-líquido) es mayor que la temperatura de solidificación. La temperatura del sólido está a o por debajo de la temperatura de solidificación. Durante ésta, el calor latente de fusión se elimina por conducción de la interfase sólido-líquido. Cualquier protuberancia pequeña que comienza a crecer en la interfase está rodeada por líquido por encima de la temperatura de solidificación (figura 9-3). El crecimiento de la protuberancia se detiene cuando el resto de la interfase la alcanza. Este mecanismo de crecimiento, conocido como **crecimiento planar**, ocurre debido al movimiento de una interfase sólido-líquido lisa o plana hacia el líquido.

Crecimiento dendrítico

Cuando el líquido no está inoculado y la formación de núcleos es mala, el líquido tiene que subenfriarse antes de que se forme el sólido (figura 9-4). En estas condiciones, se promueve que crezca una protuberancia sólida pequeña llamada **dendrita**, la cual se forma en la interfase, dado que el líquido más allá del frente de solidificación está subenfriado y es

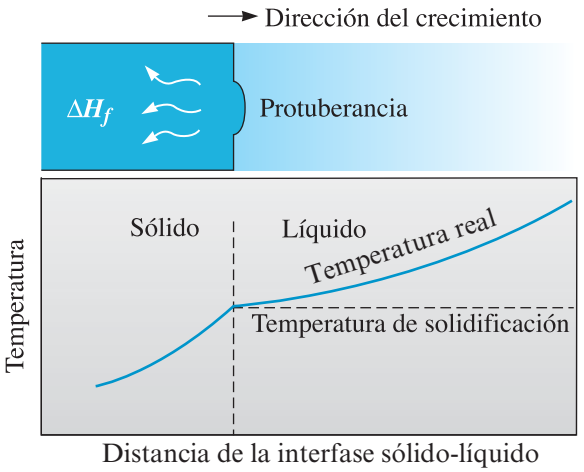
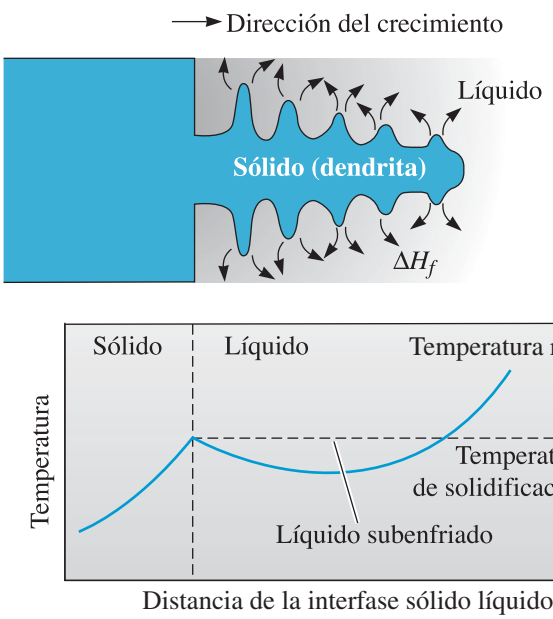
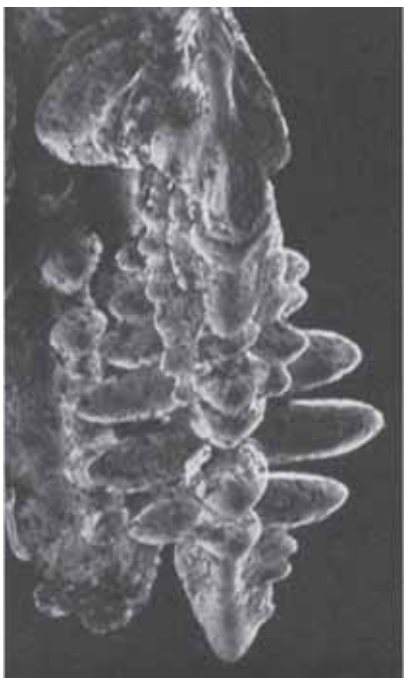


Figura 9-3 Cuando la temperatura del líquido está por encima de la temperatura de solidificación, no crecerá ninguna protuberancia sobre la interfase sólido-líquido, lo que produce el mantenimiento de una interfase plana. El calor latente se elimina de la interfase a través del sólido.



a)



b)

Figura 9-4 *a*) Si se subenfría el líquido, una protuberancia sobre la interfase sólido-líquido puede crecer más rápido como una dendrita. El calor latente de fusión se elimina incrementando la temperatura del líquido a la temperatura de solidificación. *b*) Micrografía electrónica de barrido de las dendritas en el acero (15 ×). (*Reimpresión cortesía de Don Askeland*).

inducido a crecer. La palabra dendrita proviene de la palabra griega *dendron,* que significa árbol. A medida que la dendrita sólida crece, el calor latente de fusión es conducido en el líquido subenfriado, lo cual eleva la temperatura del líquido hacia la temperatura de solidificación. También pueden formarse brazos dendríticos secundarios y terciarios sobre los tallos primarios para acelerar la evolución del calor latente. El crecimiento dendrítico continúa hasta que se calienta el líquido subenfriado hasta la temperatura de solidificación. Cualquier líquido restante se solidifica por medio del crecimiento planar. La diferencia entre el crecimiento planar y el dendrítico surge debido a las distintas disipaciones de calor latente de fusión. El contenedor o molde debe absorber el calor que se produce en el crecimiento planar, pero el líquido subenfriado absorbe el calor en el crecimiento dendrítico.

En los metales puros el crecimiento dendrítico por lo general sólo representa una fracción pequeña del crecimiento total y está dado por

$$\text{Fracción dendrítica} = f = \frac{c\Delta T}{\Delta H_f} \tag{9-3}$$

donde c es el calor específico del líquido. El numerador representa el calor que puede absorber el líquido subenfriado y el calor latente en el denominador representa el calor total que debe eliminarse durante la solidificación. A medida que aumenta la ΔT del subenfriamiento, ocurre más crecimiento dendrítico. Si el líquido está bien inoculado, el subenfriamiento es casi cero y el crecimiento se produciría principalmente por medio del mecanismo de solidificación del frente plano.

9-5 Tiempo de solidificación y tamaño dendrítico

La velocidad a la que ocurre el crecimiento del sólido depende de la rapidez de enfriamiento o, lo que es lo mismo, la rapidez de extracción del calor. Una mayor velocidad de enfriamiento produce una solidificación rápida o tiempos de solidificación cortos. El tiempo t_s, que se requiere para que una pieza colada sencilla se solidifique por completo puede calcularse mediante la **regla de Chvorinov**:

$$t_s = \mathrm{B}\left(\frac{V}{A}\right)^n \tag{9-4}$$

donde V es el volumen de la pieza colada y representa la cantidad de calor que debe eliminarse antes de que ocurra la solidificación, A es el área de superficie de la pieza colada en contacto con el molde y representa la superficie a partir de la cual puede transferirse el calor fuera de la pieza colada, n es una constante (por lo regular de alrededor de 2) y B es la **constante del molde**. Esta constante depende de las propiedades y las temperaturas iniciales del metal y del molde. Esta regla explica de manera básica la geometría de una pieza colada y las condiciones de transferencia de calor. La regla enuncia que, en las mismas condiciones, una pieza colada con un volumen pequeño y un área de superficie relativamente grande se enfriará más rápido.

Ejemplo 9-2 *Rediseño de una pieza colada para mejorar la resistencia*

Actualmente su empresa produce una pieza colada de latón en forma de disco de 50.8 mm de grosor y 457 mm de diámetro. Cree que al hacer que la pieza colada se solidifique 25% más rápido, la mejora en sus propiedades de tensión la hará más ligera. Diseñe la pieza colada que permita este proceso. Suponga que la constante del molde en este proceso es de 2.046×10^6 s/m^2 y $n = 2$.

SOLUCIÓN

Un método sería utilizar el mismo proceso de fundición, pero ello reduce el grosor de la pieza colada. La pieza colada más delgada se solidificará más rápido y, debido al enfriamiento más veloz, deben mejorarse las propiedades mecánicas. La regla de Chvorinov ayuda a calcular el grosor que se requiere. Si d es el diámetro y x es el grosor de la pieza colada, entonces el volumen, el área de superficie y el tiempo de solidificación de la pieza colada de 50.8 mm de grosor son

$$V = (\pi/4)d^2x = (\pi/4)(0.457\ \text{m})^2(0.0508\ \text{m}) = 8.34 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$$

$$A = 2(\pi/4)d^2 + \pi dx = 2(\pi/4)(0.457\ \text{m})^2 + \pi(0.457\ \text{m})(0.0508\ \text{m}) = 0.4013\ \text{m}^2$$

$$t = \mathrm{B}\left(\frac{V}{A}\right)^2 = (2.046 \times 10^6\ \text{s/m}^2)\left(\frac{8.34 \times 10^{-3}\ \text{m}^3}{0.4013\ \text{m}^2}\right)^2 = 884\ \text{s}$$

El tiempo de solidificación t_r de la pieza colada rediseñada debe ser 25% menor al tiempo actual:

$$t_r = 0.75t = (0.75)(884\ \text{s}) = 663\ \text{s}$$

Dado que las condiciones de pieza colada no han cambiado, la constante del molde B no cambia. La razón V/A de la nueva pieza colada es

$$t_r = \mathrm{B}\left(\frac{V_r}{A_r}\right)^2 = (2.046 \times 10^6\ \mathrm{s/m^2})\left(\frac{V_r}{A_r}\right)^2 = 663\ \mathrm{s}$$

$$\left(\frac{V_r}{A_r}\right)^2 = 3.24 \times 10^{-4}\ \mathrm{m^2} \quad \text{o} \quad \frac{V_r}{A_r} = 0.018\ \mathrm{m}$$

Si x es el grosor que se requiere para esta pieza colada rediseñada, entonces

$$\frac{V_r}{A_r} = \frac{(\pi/4)d^2x}{2(\pi/4)d^2 + \pi dx} = \frac{(\pi/4)(0.457\ \mathrm{m})^2(x)}{2(\pi/4)(0.457\ \mathrm{m})^2 + \pi(0.457\ \mathrm{m})(x)} = 0.018\ \mathrm{m}$$

Por lo tanto, $x = 42.7$ mm.

Este grosor proporciona el tiempo de solidificación que se requería, mientras que la reducción del peso total de la pieza colada es mayor de 15%.

La solidificación comienza en la superficie, donde el calor se disipa en el material del molde que lo rodea. La rapidez de solidificación de una pieza colada puede describir la velocidad a la que crece el grosor d de la corteza solidificada:

$$d = \mathrm{k_{solidificación}}\sqrt{t} - \mathrm{c_1} \tag{9-5}$$

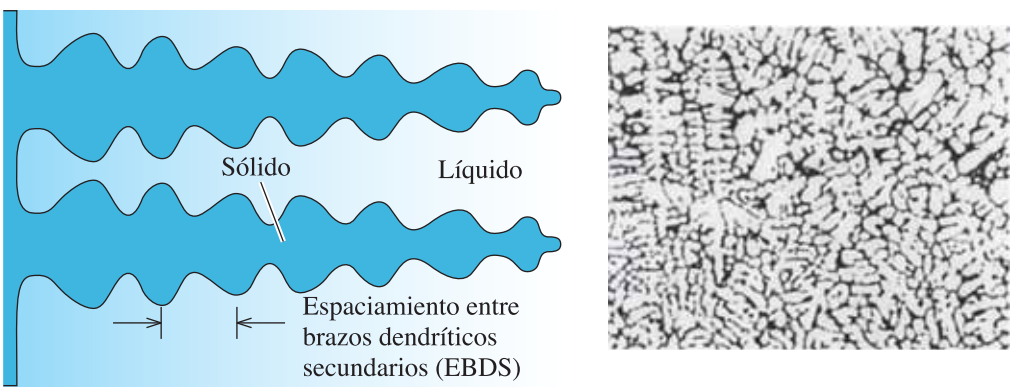
donde t es el tiempo después del vertido, $\mathrm{k_{solidificación}}$ es una constante de un material de pieza colada y molde dados y $\mathrm{c_1}$ es una constante relacionada con la temperatura del vertido.

Efecto sobre la estructura y las propiedades

El tiempo de solidificación afecta el tamaño de las dendritas que, por lo general, se caracteriza midiendo la distancia entre los brazos dendríticos secundarios (figura 9-5). El **espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios** (EBDS) se reduce cuando la pieza se enfría de manera más rápida. La red dendrítica más fina y extensiva sirve como un conductor más eficiente del calor latente al líquido subenfriado. El EBDS se relaciona con el tiempo de solidificación por medio de

$$\mathrm{SDAS} = \mathrm{k}t_s^{\mathrm{m}} \tag{9-6}$$

donde m y k son constantes que dependen de la composición del metal. Esta relación de varias aleaciones se muestra en la figura 9-6. Los espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios pequeños están asociados con resistencias más altas y mejor ductilidad (figura 9-7).



a) ***b)***

Figura 9-5 *a*) Espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS). *b*) Dendritas de una aleación de aluminio (50 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados, www.asminternational.org*.]

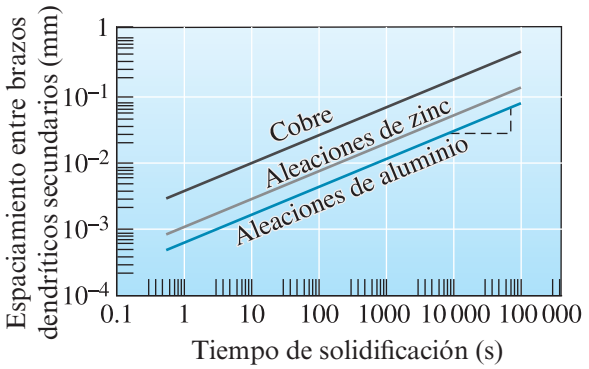


Figura 9-6 Efecto del tiempo de solidificación sobre los espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios del cobre, zinc y aluminio.

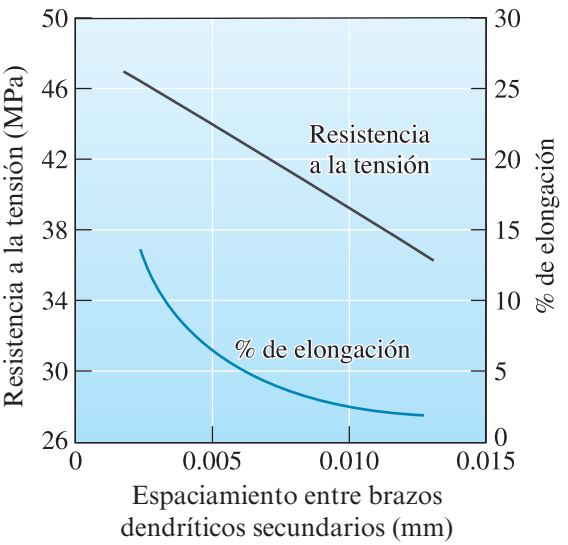


Figura 9-7 Efecto del espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación fundida de aluminio.

El procesamiento de solidificación rápida se emplea para producir espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios excepcionalmente finos; un método común es producir gotas líquidas muy finas que se solidifiquen en partículas sólidas. A este proceso se le conoce como atomización por rocío. Las gotas pequeñas, que se solidifican a una velocidad de alrededor de 10^4°C/s, producen partículas de polvo que varían de ~5 − 100 μm. Esta velocidad de enfriamiento no es lo suficientemente rápida para formar un vidrio metálico, pero produce una estructura dendrítica fina. Si se consolidan con cuidado las gotas sólidas por medio de los procesos de metalurgia de polvos, se puede obtener un material con mejores propiedades. Dado que las partículas se derivan de una fusión, pueden producirse varias composiciones de aleaciones complejas en forma de polvos químicamente homogéneos.

Los siguientes tres ejemplos explican cómo pueden utilizarse la regla de Chvorinov, la relación entre el EBDS y el tiempo de solidificación, y las propiedades mecánicas para diseñar procesos de fundición.

Ejemplo 9-3 *Espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios de aleaciones de aluminio*

Determine las constantes de la ecuación que describe la relación entre el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios y el tiempo de solidificación en aleaciones de aluminio (figura 9-6).

SOLUCIÓN

Se puede obtener el valor del EBDS en dos tiempos a partir de la gráfica y calcular k y m por medio de ecuaciones simultáneas; sin embargo, si las escalas en la ordenada y en la abscisa son iguales para potencias de 10 (como en la figura 9-6), se puede obtener la pendiente m a partir de la gráfica log-log midiendo de manera directa la pendiente de la gráfica. En la figura 9-6 se pueden

marcar cinco unidades iguales en la escala vertical y 12 unidades iguales en la escala horizontal. La pendiente es

$$m = \frac{5}{12} = 0.42$$

La constante k es el valor del EBDS donde $t_s = 1$ s, dado que

$$\log \text{EBDS} = \log k + m \log t_s$$

Si $t_s = 1$ s,($m \log t_s$) = 0 y EBDS = k, a partir de la figura 9-6:

$$k = 7 \times 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Ejemplo 9-4 *Tiempo de solidificación*

Una barra de aluminio de 101.6 mm de diámetro se solidifica hasta una profundidad de 12.7 mm bajo la superficie en 300 s. Después de 1,200 s, la barra se ha solidificado hasta una profundidad de 38.1 mm. ¿Cuánto tiempo se requiere para que la barra se solidifique por completo?

SOLUCIÓN

A partir de estas mediciones se pueden determinar las constantes $k_{\text{solidificación}}$ y c_1 de la ecuación 9-5:

$$12.7 \text{ mm} = k_{\text{solidificación}}\sqrt{300 \text{ s}} - c_1 \quad \text{o} \quad c_1 = k\sqrt{300} - 12.7$$

$$38.1 \text{ mm} = k_{\text{solidificación}}\sqrt{1200} - c_1 = k\sqrt{1200} - (k\sqrt{300} - 12.7)$$

$$38.1 = k_{\text{solidificación}}(\sqrt{1200} - \sqrt{300}) + 12.7$$

$$k_{\text{solidificación}} = \frac{38.1 - 12.7}{34.64 - 17.32} = 1.467 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{s}}}$$

$$c_1 = (1.467)\sqrt{300} - 12.7 = 12.7 \text{ mm}$$

La solidificación se completa cuando $d = 50.8$ mm (la mitad del diámetro, dado que se está llevando a cabo a partir de todas las superficies):

$$50.8 = 1.467\sqrt{t} - 12.7 \text{ mm}$$

$$\sqrt{t} = \frac{50.8 + 12.7}{1.467} = 43.28 \sqrt{\text{s}}$$

$$t = 1874 \text{ s}$$

En la práctica real, se encontraría que el tiempo de solidificación total es un poco mayor de 1,874 s. A medida que continúa la solidificación, el molde se calienta más y es menos eficaz para eliminar el calor de la pieza colada.

Ejemplo 9-5 *Diseño de una pieza colada de una aleación de aluminio*

Diseñe el grosor de una pieza colada de una aleación de aluminio con una longitud de 304.8 mm, un ancho de 203.2 mm y una resistencia a la tensión de 290 MPa. La constante del molde de la regla de Chvorinov para la fundición de las aleaciones de aluminio es de 4.185×10^6 s/m^2. Suponga que puede utilizarse la información que se muestra en las figuras 9-6 y 9-7.

SOLUCIÓN

Para obtener una resistencia a la tensión de 290 MPa, se requiere un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios de alrededor de 0.07 mm (vea la figura 9-7). A partir de la figura 9-6 se puede determinar que el tiempo de solidificación que se requiere para obtener este espaciamiento es de alrededor de 300 s o 5 minutos.

Según la regla de Chvorinov

$$t_s = \mathrm{B}\left(\frac{V}{A}\right)^2$$

donde $\mathrm{B} = 4.185 \times 10^6$ m/s^2 y x es el grosor de la pieza. Dado que la longitud es de 304.8 mm y el ancho es de 203.2 mm,

$$V = (0.2032\ \text{m})(0.3048\ \text{m})(x) = 0.06194x$$

$$A = (2)(0.2032\ \text{m})(0.3048\ \text{m}) + (2)(x)(0.2032\ \text{m}) + (2)(x)(0.3048\ \text{m}) = 1.016x + 0.1239$$

$$300\ \text{s} = (4.185 \times 10^6\ \text{s/m}^2)\left(\frac{0.06194x}{1.016x + 0.1239}\right)^2$$

$$\frac{0.06194x}{1.016x + 0.1239} = \sqrt{(300/4.185 \times 10^6)} = 0.00847$$

$$0.06194x = 0.008602x + 1.05 \times 10^{-3}$$

$$x = 0.0196\ \text{m}$$

9-6 Curvas de enfriamiento

En este punto, la explicación se puede resumir mediante el análisis de las curvas de enfriamiento. Una curva de enfriamiento muestra cómo disminuye con el tiempo la temperatura de un material (en este caso, un metal puro) [figura 9-8*a*) y *b*)]. El líquido se vierte en un molde a la temperatura del vertido, punto *A*. La diferencia entre la temperatura del vertido y la temperatura de solidificación es el sobrecalentamiento. El calor específico lo extrae el molde cuando el líquido alcanza la temperatura de solidificación (punto *B*). Si el líquido no está bien inoculado, debe subenfriarse (punto *B* a *C*). La pendiente de la curva de enfriamiento antes de que comience la solidificación es la velocidad de enfriamiento $\Delta T/\Delta t$. A medida que comienza la formación de núcleos (punto *C*), se elimina el calor

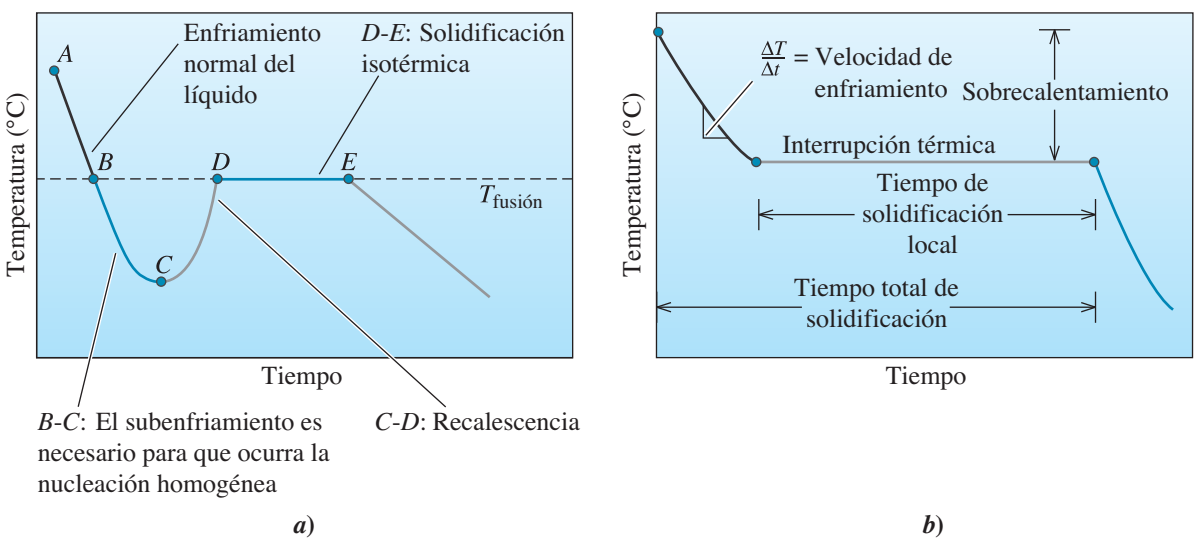


Figura 9-8 *a*) Curva de enfriamiento de un metal puro que no ha sido bien inoculado. El líquido se enfría a medida que se elimina el calor específico (entre los puntos *A* y *B*). Por lo tanto, es necesario el subenfriamiento (entre los puntos *B* y *C*). A medida que comienza la formación de núcleos (punto *C*), se libera el calor latente de fusión, lo que provoca un incremento de la temperatura del líquido. A este proceso se le conoce como recalescencia (punto *C* al *D*). El metal continúa solidificándose a una temperatura constante ($T_{\text{fusión}}$). En el punto *E* se completa la solidificación. La pieza colada sólida continúa enfriándose desde este punto. *b*) Curva de enfriamiento de un metal bien inoculado, que de otra manera sería puro. No se necesita subenfriamiento. No se observa recalescencia. La solidificación comienza a la temperatura de fusión.

latente de fusión y se incrementa la temperatura. A este incremento de la temperatura del líquido subenfriado como resultado de la formación de núcleos se le conoce como **recalescencia** (punto *C* a *D*). La solidificación procede de manera isotérmica a la temperatura de fusión (punto *D* a *E*) a medida que el calor latente perdido durante la solidificación continua es balanceado por el calor perdido por el enfriamiento. A esta región entre los puntos *D* y *E*, donde la temperatura es constante, se le conoce como **interrupción térmica**. Se produce una interrupción, o meseta, térmica debido a que la evolución del calor latente de fusión equilibra el calor que se está perdiendo debido al enfriamiento. En el punto *E* se completa la solidificación y la pieza colada sólida se enfría del punto *E* hasta la temperatura ambiente.

Si el líquido está bien inoculado, por lo general la extensión del subenfriamiento y la recalescencia son muy pequeñas y sólo puede observarse en las curvas de enfriamiento por medio de mediciones muy cuidadosas. Si se presentan en el líquido núcleos heterogéneos efectivos, la solidificación comienza a la temperatura de solidificación [figura 9-8*b*)]. El calor latente mantiene el líquido restante a la temperatura de solidificación hasta que todo el líquido se ha solidificado y no puede desarrollar más calor. El crecimiento en estas condiciones es plano. El **tiempo de solidificación total** de la pieza colada es el tiempo que se necesita para eliminar el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. Medido desde el tiempo del vertido hasta que se completa la solidificación, este tiempo está dado por la regla de Chvorinov. El **tiempo de solidificación local** es el tiempo que se requiere para eliminar sólo el calor latente de fusión en una parte localizada en la pieza colada; se mide desde que comienza la solidificación hasta que ésta se completa. Los tiempos de solidificación locales (y los tiempos de solidificación totales) de los líquidos solidificados por subenfriamiento y los líquidos inoculados serán ligeramente distintos.

Con frecuencia se utilizan los términos "temperatura de fusión" y "temperatura de solidificación" mientras se explica la solidificación. Sería más preciso utilizar el término "temperatura de fusión" para describir cuando un sólido se convierte por completo en un líquido. En el caso de los metales y compuestos puros, este fenómeno sucede a una temperatura fija (bajo el supuesto de una presión fija) y sin sobrecalentamiento. La "temperatura de solidificación" o "punto de solidificación" puede definirse como la temperatura a la que se completa la solidificación de un material.

9-7 Estructura de la pieza colada

Cuando se fabrican componentes por colado o vaciado, con frecuencia los metales fundidos se vierten en moldes y se los deja en ellos hasta que se solidifiquen. El molde produce una forma terminada, conocida como *pieza colada* o *vaciada*. En otros casos, produce una forma sencilla, llamada **lingote**. Por lo regular, un lingote requiere una deformación plástica extensa antes de que se elabore el producto terminado. Una *macroestructura*, a la que en algunas ocasiones se la conoce como **estructura de lingote**, consiste en hasta tres regiones (figura 9-9). (Recuerde que en el capítulo 2 se utilizó el término "macroestructura" para describir la estructura de un material a una escala macroscópica. Por lo tanto, el término "estructura de lingote" puede ser más apropiado.)

Zona de enfriamiento

La **zona de enfriamiento** es una banda estrecha de granos orientados de manera aleatoria en la superficie de la pieza colada. El metal ubicado en la pared del molde es el primero en enfriarse a la temperatura de solidificación. La pared del molde también cuenta con varias superficies en las que tiene lugar la nucleación heterogénea.

Zona columnar

La **zona columnar** contiene granos alargados orientados en una dirección cristalográfica específica. A medida que el calor de la pieza colada es eliminado por el material en el molde, los granos de la zona de enfriamiento crecen en dirección opuesta al flujo del calor, esto es, del área más fría a la más caliente de la pieza colada. Por lo general, esta tendencia significa que los granos crecen perpendiculares a la pared del molde.

Los granos crecen más rápido en ciertas direcciones cristalográficas. En el caso de los metales con una estructura cristalina cúbica, los granos de la zona de enfriamiento que tienen una dirección <100> perpendicular a la pared del molde crecen más rápido que los otros granos orientados

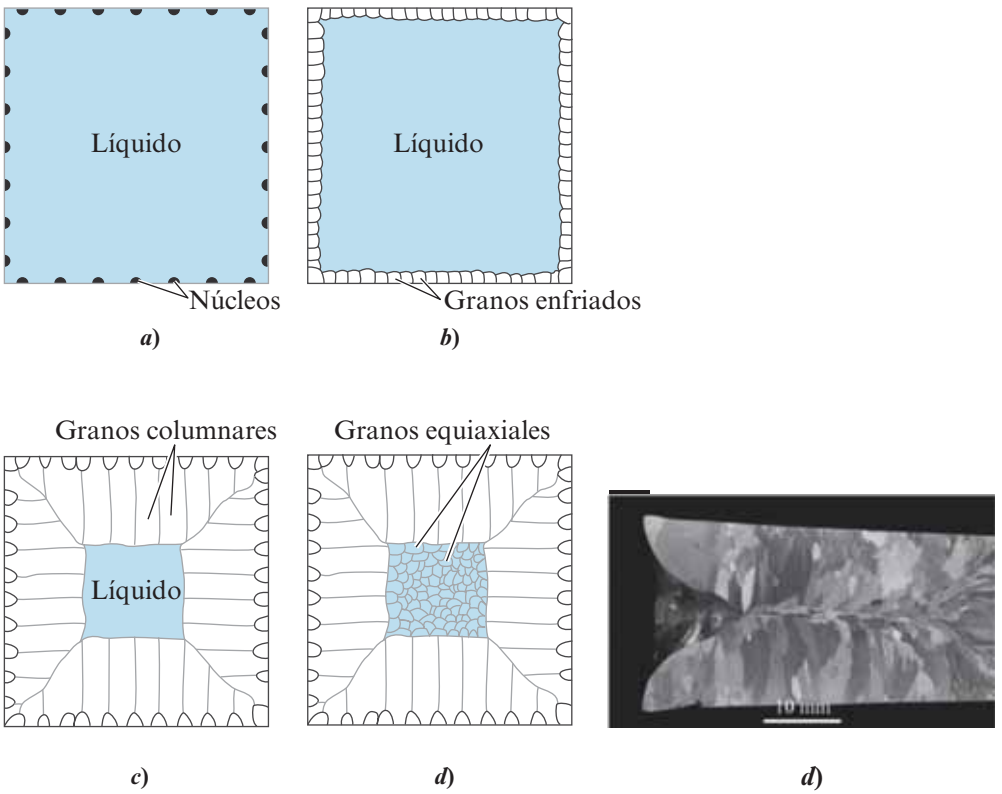


Figura 9-9 Desarrollo de la estructura de lingote de una pieza colada durante la solidificación: *a*) comienza la formación de núcleos, *b*) se forma la zona de enfriamiento, *c*) el crecimiento preferido produce la zona columnar, *d*) la nucleación adicional crea la zona equiaxial y *e*) la estructura de lingote de un colado de aluminio puro comercial. (*Cortesía de Bill Clyne*)

de manera menos favorable (figura 9-10). Con el tiempo, los granos de la zona columnar tienen direcciones <100> que son paralelas entre sí, lo que da a la zona columnar propiedades anisotrópicas. Esta formación de la zona columnar es influida principalmente por el fenómeno del crecimiento, en vez de por la formación de núcleos. Los granos pueden estar compuestos por muchas dendritas si el líquido está originalmente subenfriado. La solidificación puede proceder por medio del crecimiento planar de los granos columnares si no ocurre el subenfriamiento.

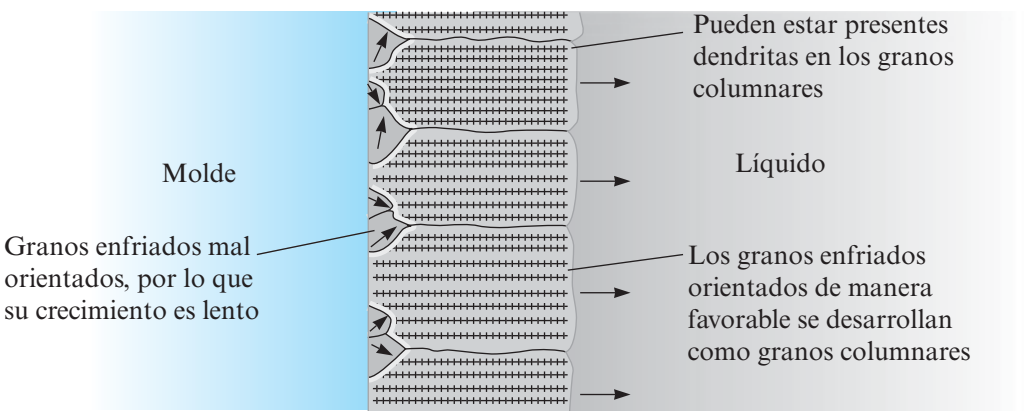


Figura 9-10 El crecimiento competitivo de los granos en la zona de enfriamiento da como resultado que sólo aquellos con orientaciones favorables se desarrollen como granos columnares.

Zona equiaxial

Aunque el sólido puede continuar creciendo de una manera columnar hasta que se solidifica todo el líquido, con frecuencia se forma una zona equiaxial en el centro de la fundición o lingote. La **zona equiaxial** contiene nuevos granos orientados de manera aleatoria, a menudo ocasionados por una temperatura baja del vertido, elementos de aleación o agentes de refinamiento o inoculación de granos. Los granos o dendritas pequeños de la zona de enfriamiento también pueden disgregarse debido a las fuertes corrientes de convección que se forman cuando la pieza colada comienza a solidificarse. Éstos también proporcionan sitios de nucleación heterogénea para que, por último, los granos se conviertan en equiaxiales. Estos granos crecen como granos relativamente redondos, o equiaxiales, con una orientación aleatoria, y detienen el crecimiento de los granos columnares. La formación de la zona equiaxial es un proceso controlado por la formación de núcleos y ocasiona que la parte de la pieza colada muestre un comportamiento isotrópico.

Si se comprenden los factores que influyen en la solidificación en las distintas regiones es posible producir piezas coladas que formen primero una "corteza" de una zona de enfriamiento y después dendritas. A los metales y aleaciones que muestran esta macroestructura se les conoce como **aleaciones de formación de corteza**. También se puede controlar la solidificación, de manera que no se observe una corteza o los arreglos de granos dendríticos avanzados; el cambio columnar a equiaxial ocurre cerca de las paredes del molde. El resultado es una pieza colada con una macroestructura que consiste de manera predominante en granos equiaxiales. A los metales y aleaciones que se solidifican de esta manera se les conoce como **aleaciones de formación de pasta**, dado que el material fundido es similar a una pasta de granos sólidos que flotan en una fusión líquida. Muchas aleaciones de aluminio y magnesio muestran este tipo de solidificación. Con frecuencia, se estimula la creación de una estructura totalmente equiaxial y por lo tanto se crea una pieza colada con propiedades isotrópicas por medio del refinamiento o inoculación efectiva de los granos. En una sección posterior se estudiará un caso (álabes de turbinas) donde se controla la solidificación para que todos los granos sean columnares y que, por ello, presenten un comportamiento anisotrópico.

La estructura y la microestructura de los lingotes fundidos son muy importantes, en particular en el caso de piezas que se vierten de manera directa en una forma final. Sin embargo, en varias situaciones, como se explicó en la sección 9-1, los metales y aleaciones se vierten primero en lingotes y éstos son sometidos después al procesamiento termomecánico (por ejemplo, laminado, forjado, etc.). Durante estas etapas, la macroestructura de la pieza colada se descompone y emergerá una nueva microestructura, cuyas características dependerán del proceso termomecánico que se haya empleado (capítulo 8).

9-8 Defectos de solidificación

Aunque existen varios defectos que es posible que pueden producirse durante la solidificación, la contracción y la porosidad merecen una mención especial. Si una pieza colada contiene poros (orificios pequeños), puede fallar de manera catastrófica cuando se emplea para aplicaciones de soporte de carga (por ejemplo, álabes de turbinas).

Contracción

Casi todos los materiales son más densos en estado sólido que en líquido. Durante la solidificación, el material se contrae, o encoge, hasta 7% (tabla 9-2).

Con frecuencia, la mayoría de las **contracciones** se presentan como **cavidades**, si la solidificación comienza en todas las superficies de la pieza colada, o *rechupes*, si una superficie se solidifica de manera más lenta que las otras (figura 9-11). La presencia de tales rechupes puede causar problemas. Por ejemplo, si en la producción de lingotes de zinc permanece un rechupe de contracción, el vapor de agua puede condensarse en él. Esta agua puede provocar una explosión si el lingote se introduce en un horno en el que el zinc se fundirá nuevamente para aplicaciones como el galvanizado por inmersión en caliente.

Una técnica común para controlar la **contracción por cavidades** y **por rechupes** es colocar una **mazarota**, o una reserva adicional del metal, adyacente y conectada a la pieza colada. A medida que ésta se solidifica y encoge, el metal líquido fluye de la mazarota hacia ella para llenar el vacío por contracción. Sólo se necesita asegurar que la mazarota se solidifique después que la pieza colada y que haya un canal líquido interno que conecte el líquido de la mazarota con el último líquido que se solidificará en la pieza colada. Puede emplearse la regla de Chvorinov como ayuda para diseñar el

Tabla 9-2 Contracción durante la solidificación de algunos materiales

Material	Contracción (%)
Al	7.0
Cu	5.1
Mg	4.0
Zn	3.7
Fe	3.4
Pb	2.7
Ga	+3.2 (expansión)
H_2O	+8.3 (expansión)
Acero al bajo carbono	2.5–3.0
Acero al alto carbono	4.0
Hierro colado blanco	4.0–5.5
Hierro colado gris	+1.9 (expansión)

En parte, basado en DeGarmo, E.P., Black, J.T. y Koshe, R.A., Materials and Processes in Manufacturing, *Prentice Hall, 1997.*

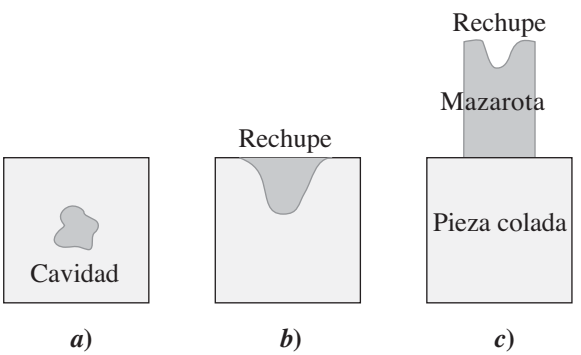


Figura 9-11 Pueden ocurrir varios tipos de macrocontracción, entre ellos, *a*) cavidades y *b*) rechupes. Asimismo, pueden utilizarse *c*) mazarotas para ayudar a compensar la contracción.

tamaño de la mazarota. El siguiente ejemplo ilustra cómo pueden diseñarse mazarotas que compensen la contracción.

Ejemplo 9-6 *Diseño de una mazarota para colar una pieza*

Diseñe una mazarota cilíndrica, con una altura igual al doble de su diámetro, que compensará la contracción en una pieza colada de 20 mm × 80 mm × 160 mm (figura 9-12).

SOLUCIÓN

Se sabe que la mazarota debe solidificarse después de la pieza colada. Conservadoramente, por lo general se requiere que la mazarota tarde 25% más en solidificarse que la pieza. Por lo tanto,

$$t_m = 1.25t_f \quad \text{o} \quad \left(\frac{V}{A}\right)_m^2 = 1.25\left(\frac{V}{A}\right)_f^2$$

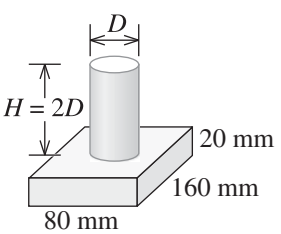


Figura 9-12 Geometría de la pieza colada y de la mazarota (ejemplo 9-6).

Los subíndices *m* y *f* representan la mazarota y la pieza colada, respectivamente. La constante del molde B es la misma para la pieza colada y la mazarota, por lo que

$$\left(\frac{V}{A}\right)_m = \sqrt{1.25}\left(\frac{V}{A}\right)_f$$

El volumen de la pieza colada es

$$V_c = (20\text{ mm})(80\text{ mm})(160\text{ mm}) = 2.56 \times 10^5\text{ mm}^3 = 2.56 \times 10^{-4}\text{ m}^3$$

El área de la mazarota unida a la pieza colada debe restarse del área total de superficie de la pieza colada para calcular el área de superficie de la pieza colada en contacto con el molde:

$$A_c = (2)(0.02\text{ m})(0.08\text{ m}) + (2)(0.02\text{ m})(0.16\text{ m}) + (2)(0.08\text{ m})(0.16\text{ m}) - \frac{\pi D^2}{4}$$

$$= 0.0352\text{ m}^2 - \frac{\pi D^2}{4}$$

donde *D* es el diámetro de la mazarota cilíndrica. Se pueden escribir las ecuaciones del volumen y del área de la mazarota cilíndrica, observando que la altura del cilindro $H = 2D$:

$$V_r = \frac{\pi D^2}{4}H = \frac{\pi D^2}{4}(2D) = \frac{\pi D^3}{2}$$

$$A_r = \frac{\pi D^2}{4} + \pi DH = \frac{\pi D^2}{4} + \pi D(2D) = \frac{9}{4}\pi D^2$$

donde de nuevo no se ha incluido el área de la mazarota unida a la pieza colada en el cálculo del área. La razón volumen a área de la mazarota está dada por

$$\left(\frac{V}{A}\right)_r = \frac{(\pi D^3/2)}{(9\pi D^2/4)} = \frac{2}{9}D$$

y debe ser mayor que la de la pieza colada con base en

$$\left(\frac{V}{A}\right)_r = \frac{2}{9}D > \sqrt{1.25}\left(\frac{V}{A}\right)_c$$

Sustituyendo,

$$\frac{2}{9}D > \sqrt{1.25}\left(\frac{2.56 \times 10^{-4}\text{ m}^3}{0.0352\text{ m}^2 - \pi D^2/4}\right)$$

Resolviendo para el diámetro más pequeño de la mazarota:

$$D = 0.0378\text{ m o }37.8\text{ mm}$$

Aunque el volumen de la mazarota es menor que el de la pieza colada, se solidifica más lentamente debido a su forma compacta.

Contracción interdendrítica

Consiste en pequeños poros por contracción entre las dendritas (figura 9-13). Este defecto, también llamado **microcontracción** o **porosidad por contracción**, es difícil de prevenir por medio del uso de mazarotas. Las velocidades rápidas de enfriamiento pueden reducir los problemas de la **contracción interdendrítica**; las dendritas pueden acortarse, lo cual permite que el líquido fluya a través de la red dendrítica hasta la interfase sólida donde se solidifica. Además, cualquier contracción que permanezca puede distribuirse de manera más fina y uniforme.

Porosidad gaseosa

Muchos metales disuelven una gran cantidad de gas cuando se funden. Por ejemplo, el aluminio disuelve hidrógeno. Sin embargo, cuando el aluminio se solidifica el metal sólido sólo retiene en su estructura cristalina una pequeña fracción del hidrógeno dado que la solubilidad es notablemente menor que la del líquido (figura 9-14). El exceso de hidrógeno que no puede incorporarse en la estructura cristalina del metal o aleación sólida forma burbujas

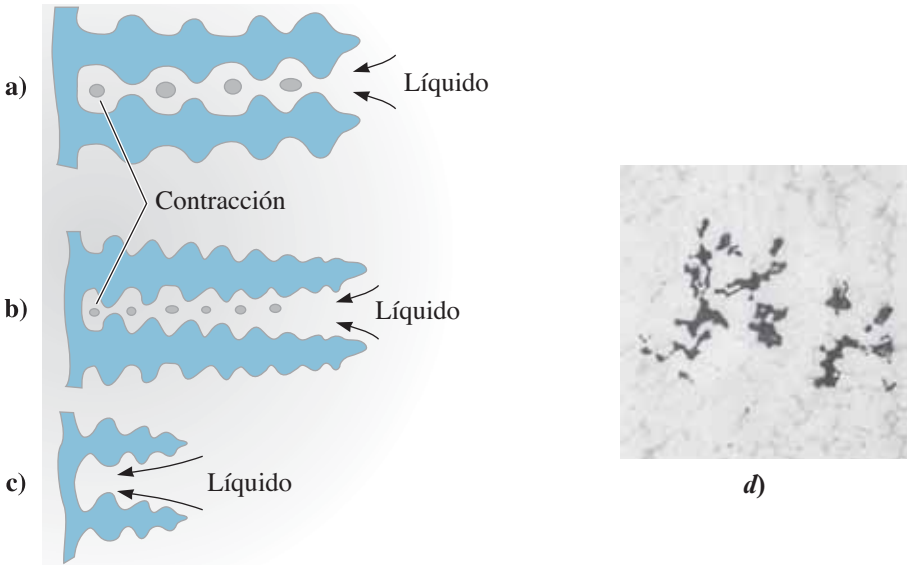


Figura 9-13 *a*) Puede ocurrir una contracción entre los brazos de dendritas. *b*) Los espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios pequeños generan una porosidad por contracción más pequeña distribuida de manera más uniforme. *c*) Los brazos primarios cortos pueden ayudar a evitar la contracción. *d*) Se muestra la contracción interdendrítica en una aleación de aluminio (80×). (*Reimpresión cortesía de Don Askeland*)

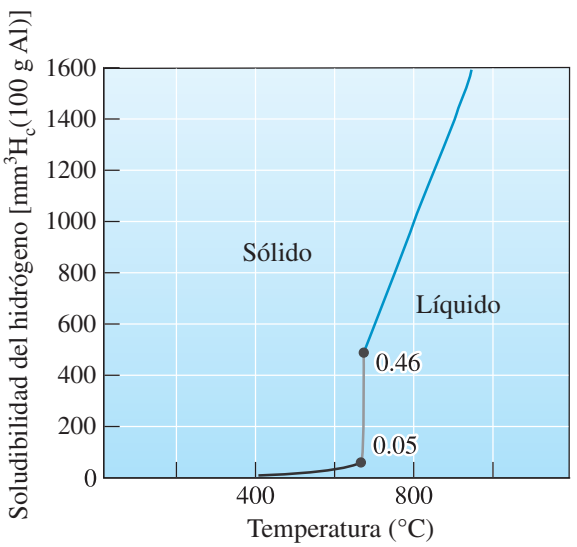


Figura 9-14 Solubilidad del gas hidrógeno en aluminio cuando la presión parcial del $H_2 = 1$ atm.

que pueden quedarse atrapadas en el metal sólido y producir **porosidad gaseosa**. La cantidad de gas que puede disolverse en el metal fundido está dada por la **ley de Sievert**:

$$\text{Porcentaje de gas} = K\sqrt{p_{gas}} \tag{9-7}$$

donde p_{gas} es la presión parcial del gas en contacto con el metal y K es una constante que, en un sistema específico metal-gas, aumenta con el incremento de la temperatura. Se puede minimizar la porosidad gaseosa en las piezas coladas si se mantiene el líquido a una temperatura baja, se le adicionan materiales al líquido para que se combinen con el gas y formen un sólido o asegurándose de que la presión parcial del gas permanezca baja. Lo último puede lograrse colocando el metal fundido en una cámara de vacío o burbujeando un gas inerte a través del metal. Debido a que la p_{gas} es baja en el vacío, el gas abandona el metal, entra al vacío y es sustraído. El **lavado con gas** es un proceso en el que se inyectan burbujas de un gas, inerte o reactivo, en un metal fundido para eliminar los

elementos no deseables de los metales y aleaciones fundidos. Por ejemplo, el hidrógeno en el aluminio puede eliminarse utilizando nitrógeno o cloro. El siguiente ejemplo ilustra cómo puede diseñarse un proceso de desgasificación.

Para fabricar **acero inoxidable** se utiliza un proceso conocido como **descarburización con oxígeno y argón** (DOA) para reducir el contenido de carbono de la fundición sin oxidar el cromo o el níquel. En este proceso, se fuerza una mezcla de argón (o nitrógeno) y oxígeno en el acero inoxidable fundido. El carbono disuelto en el acero fundido es oxidado por el gas oxígeno por medio de la formación de gas monóxido de carbono (CO), el cual es extraído por las burbujas de gas argón (o nitrógeno) inerte. Estos procesos requieren un control muy cuidadoso, dado que algunas reacciones (por ejemplo, la oxidación del carbono a CO) son exotérmicas (generan calor).

Ejemplo 9-7 *Diseño de un proceso de desgasificación del cobre*

Después de fundirse a presión atmosférica, el cobre contiene un porcentaje en peso de 0.01 de oxígeno. Para asegurar que las piezas fundidas estarán libres de porosidad gaseosa, se debe reducir el porcentaje en peso a menos de 0.00001% antes del vertido. Diseñe un proceso de desgasificación del cobre.

SOLUCIÓN

Este problema puede resolverse de varias maneras. Con base en un método, el cobre líquido se coloca en una cámara de vacío; después se extrae el oxígeno del líquido y se saca al vacío. El vacío que se requiere puede calcularse a partir de la ley de Sievert:

$$\frac{\%\,O_{inicial}}{\%\,O_{vacío}} = \frac{K\sqrt{p_{inicial}}}{K\sqrt{p_{vacío}}} = \sqrt{\left(\frac{1\text{ atm}}{p_{vacío}}\right)}$$

$$\frac{0.01\%}{0.00001\%} = \sqrt{\left(\frac{1\text{ atm}}{p_{vacío}}\right)}$$

$$\frac{1\text{ atm}}{p_{vacío}} = (1000)^2 \text{ o } p_{vacío} = 10^{-6}\text{ atm, por ejemplo, 0.103 Pa.}$$

Otro método sería introducir una aleación de cobre con 15% de fósforo. El fósforo reacciona con el oxígeno para producir P_2O_5, el cual flota sobre el líquido, por medio de la reacción:

$$5O + 2P \rightarrow P_2O_5$$

Por lo general, debe adicionarse alrededor de 0.01 a 0.02% de P para eliminar el oxígeno.

9-9 Procesos de vaciado para fabricar componentes

La figura 9-15 resume cuatro de las docenas de procesos comerciales de vaciado. En algunos de ellos pueden reutilizarse los moldes; en otros el molde es desechable. En el proceso de **vaciado en arena**, que incluye el moldeo en arena verde, los granos de arena de sílice (SiO_2) son aglutinados con arcilla húmeda y se empaquetan alrededor de un patrón sustraíble. Los procesos de vaciado de cerámicas emplean como molde un material cerámico de granos finos, ya que la lechada que contiene la cerámica puede verterse alrededor de un patrón reutilizable, el cual se retira después de que la cerámica se endurece. Cuando se recurre al **vaciado por revestimiento**, la lechada cerámica de un material como la sílice coloidal (que consiste en nanopartículas cerámicas), reviste un patrón de cera. Después de que la cerámica se endurece (es decir, los geles de la dispersión de la sílice coloidal), la cera se funde y se drena del armazón cerámico, lo que deja una cavidad que se llena con el metal fundido. Después de que el metal se solidifica, el molde se rompe para sustraer la pieza. El proceso de vaciado por revestimiento, también conocido como **proceso a la cera perdida**, es el más adecuado para generar formas

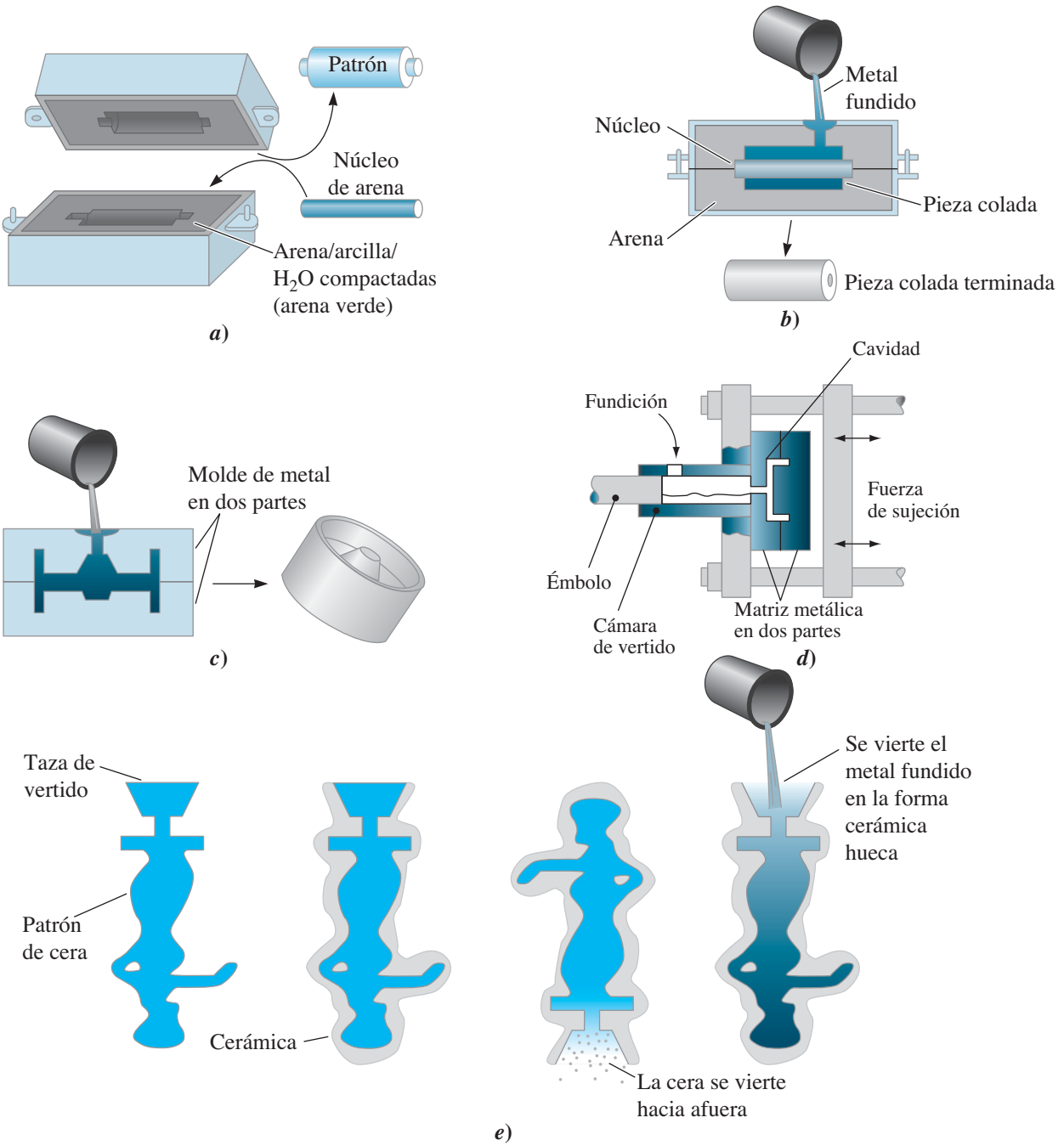


Figura 9-15 Cuatro procesos de fundición comunes: *a*) y *b*) Moldeo en arena verde, en el que se compacta arena arcillosa alrededor de un patrón. Los núcleos de arena pueden producir cavidades internas en la pieza colada. *c*) Proceso en molde permanente, en el que se vierte el metal en un molde de hierro o acero. *d*) Vaciado en matriz, en el que el metal se inyecta a presión alta en una matriz de acero. *e*) Vaciado por revestimiento o a la cera perdida, en el que el patrón de cera es rodeado por una cerámica; después de que se funde y se drena la cera, se vierte el metal en el molde.

complejas. Los dentistas y joyeros empleaban originalmente el proceso de vaciado por revestimiento debido a su precisión. En la actualidad, este proceso se utiliza para producir componentes como álabes de turbinas, cabezas de titanio de palos de golf y partes de prótesis para rodilla o cadera. En otro proceso, conocido como **proceso a la espuma perdida**, se emplean perlas de poliestireno, de manera similar a las que se utilizan para fabricar tazas para café o materiales de empaque, para producir un

patrón espumoso. Cuando se vierte el metal fundido en el molde, el patrón de espuma del polímero se funde y se descompone, mientras que el metal toma el lugar del patrón.

En los procesos de vaciado en molde permanente y a presión en matriz se maquina una cavidad en el material metálico. Después de que el líquido vertido en la cavidad se solidifica, se abre el molde, se retira la pieza colada y se reutiliza el molde. Los procesos que emplean moldes metálicos tienden a producir las fundiciones con las resistencias más altas debido a la solidificación rápida. Los moldes de cerámica, entre ellos los que se usan en la fundición por revestimiento, son buenos aislantes y producen las piezas coladas con el enfriamiento más lento y la resistencia más baja. Millones de pistones para camiones y automóviles se fabrican en fundiciones que emplean el vaciado en molde permanente. El buen acabado de la superficie y la precisión dimensional son las ventajas de la técnica de **vaciado en molde permanente**. Los altos costos del molde y la limitada y compleja forma son las restricciones de esta técnica.

En el **vaciado en matriz a presión**, el material metálico fundido se inyecta en la matriz bajo altas presiones y se mantiene así durante la solidificación. Muchas aleaciones basadas en zinc, aluminio y magnesio se procesan mediante la fundición en matriz a presión. Los acabados de superficie extremadamente lisos, la precisión dimensional muy buena, la capacidad para colar formas intrincadas y las altas velocidades de producción son las ventajas del proceso de fundición en matriz a presión. Dado que la matriz es metálica y debe soportar altas presiones, las matrices que se emplean son caras y la técnica se limita a componentes de tamaño más pequeño.

9-10 Colada continua y vaciado de lingotes

Como se explicó en la sección anterior, el vaciado es una herramienta que se emplea para fabricar diversas piezas. También es un proceso para producir lingotes o bloques que pueden procesarse

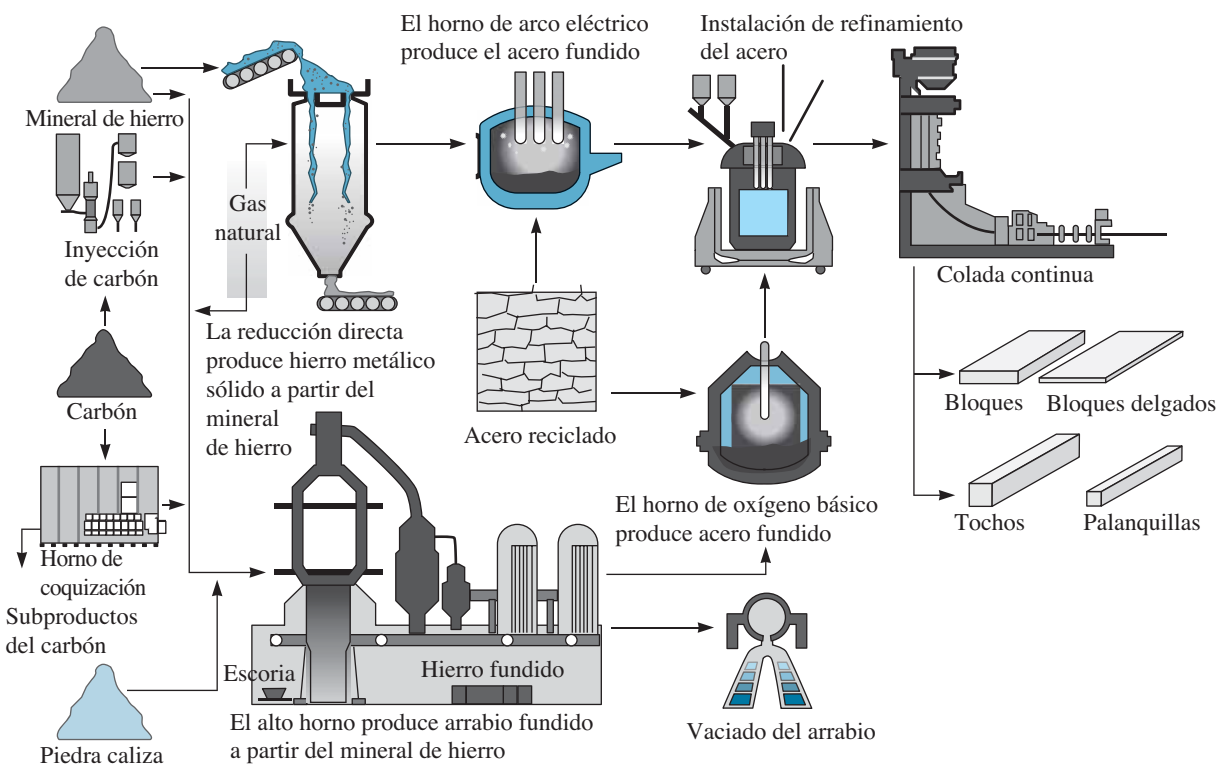


Figura 9-16 Resumen de las etapas en la extracción de aceros empleando minerales de hierro, coque y piedra caliza. (*Fuente: www.steel.org. Utilizada con permiso del American Iron and Steel Institute.*)

posteriormente en formas distintas (por ejemplo, varillas, barras, alambres, etc.). En la industria del acero se producen millones de libras en altos hornos, hornos de arco eléctrico y otros procesos. La figura 9-16 muestra un resumen de las etapas para extraer aceros utilizando minerales de hierro, coque y piedra caliza. Aunque los detalles varían, la mayoría de los metales y aleaciones (por ejemplo, el cobre y el zinc) se extraen de sus minerales mediante procesos similares. Ciertos metales, como el aluminio, se producen empleando un proceso electrolítico dado que el óxido de aluminio es muy estable y puede que no sea tan fácil de reducir a metal aluminio por medio de coque u otros agentes reductores.

En muchos casos, se comienza con chatarra y aleaciones reciclables. En éste, se funde y se procesa la chatarra, se remueven las impurezas y se ajusta la composición. Cada año se reciclan cantidades considerables de acero, aluminio, zinc, acero inoxidable, titanio y muchos otros materiales.

Cuando se emplea el **vaciado de lingotes** se obtienen aceros o aleaciones fundidas en un horno y se vacían en moldes grandes. Las piezas resultantes, llamadas lingotes, se procesan para su conversión en formas útiles por medio de un procesamiento termomecánico, con frecuencia en otra parte. En el proceso de **colada continua**, la idea es pasar del material metálico fundido a una forma "semiterminada" un poco más útil, como una placa, un bloque, etc. La figura 9-17 ilustra un método común para producir placas y barras de acero. El metal líquido se suministra desde un recipiente contenedor (una artesa de colada) a un molde oscilante de cobre enfriado con agua, el cual enfría de manera rápida la superficie del acero. El acero parcialmente solidificado se retira del molde a la misma velocidad con la que se introduce el acero líquido adicional. El centro de la pieza colada de acero se solidifica bastante después de que la pieza colada sale del molde. El material colado de manera continua se corta en longitudes apropiadas por medio de máquinas de corte especiales.

La colada continua es rentable para procesar muchos aceros, aceros inoxidables y aleaciones de aluminio. El vaciado en lingotes también es rentable y se emplea para obtener muchos aceros donde no se dispone de una colada continua o la capacidad es limitada, así como para trabajar aleaciones de metales no ferrosos (por ejemplo, zinc, cobre) donde los volúmenes son relativamente pequeños y el gasto de capital necesario para una colada continua puede no ser justificable. Además, no todas las aleaciones pueden colarse empleando el proceso de fundición continua.

En la figura 9-18 se muestran las etapas de procesamiento secundarias de aceros y otras aleaciones.

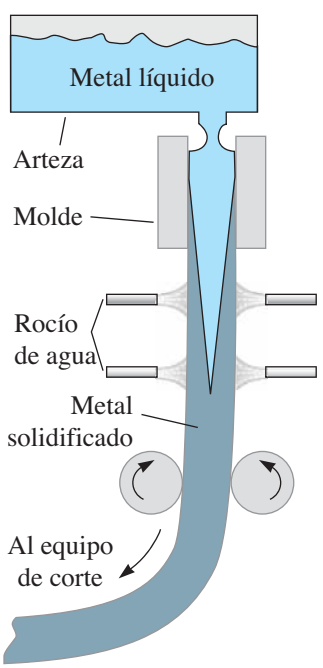


Figura 9-17 Colada continua vertical, que se emplea en la fabricación de muchos productos de acero. El metal líquido que contiene la arteza se solidifica parcialmente en un molde.

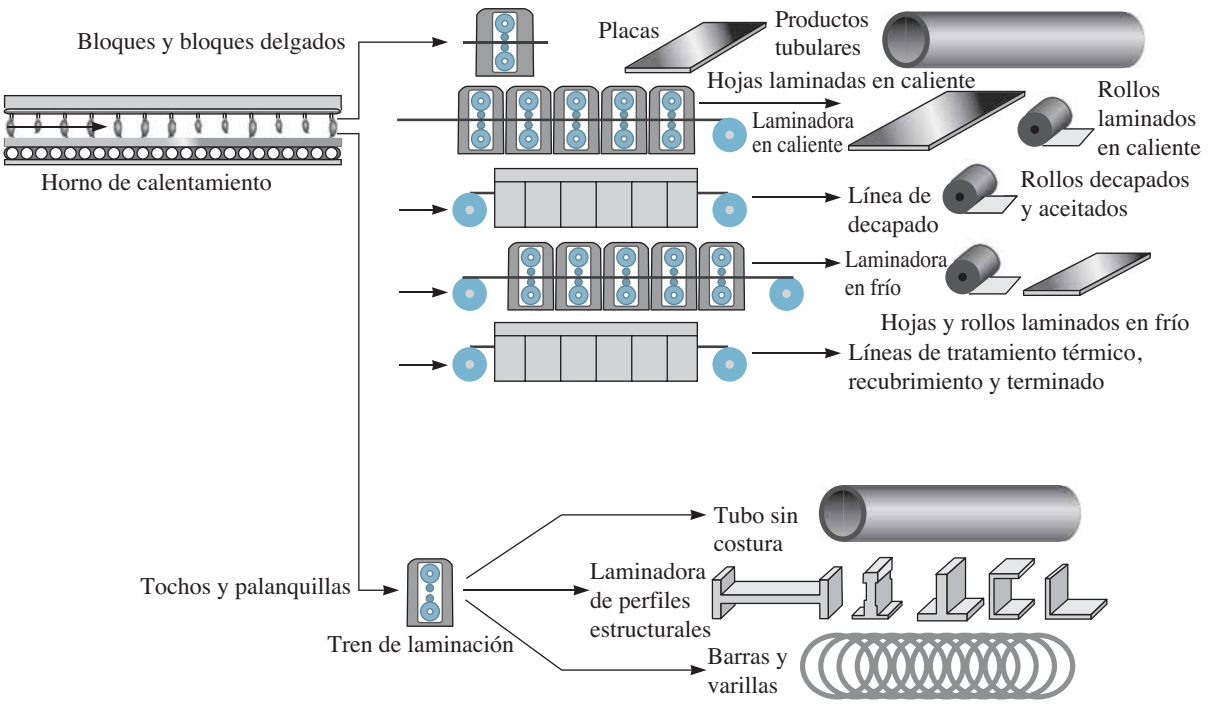


Figura 9-18 Etapas de procesamiento secundarias del acero y aleaciones. (*Fuente: www.steel.org. Utilizada con permiso del American Iron and Steel Institute.*)

Ejemplo 9-8 *Diseño de una máquina de colada continua*

La figura 9-19 muestra un método para colar de manera continua una placa de aluminio de 6.35 mm de grosor y 1.22 m de ancho que después será laminada en hojas. El aluminio líquido se introduce entre dos rodillos grandes de acero que giran con lentitud. Se desea que el aluminio sea solidificado por completo por los rodillos a medida que la placa emerge de la máquina. Los rodillos actúan como un molde permanente con una constante de molde B de alrededor de 4.65 $\times 10^5$ s/m^2 cuando el aluminio se vierte con el sobrecalentamiento apropiado. Diseñe los rodillos que requiere este proceso.

SOLUCIÓN

Sería útil simplificar la geometría de tal manera que se pueda determinar el tiempo de solidificación del colado. Se supone que el área sombreada que se muestra en la figura 9-19*b*) representa la pieza y puede aproximarse mediante el grosor promedio por una longitud y un ancho. El grosor promedio es (12.7 mm + 6.35 mm)/2 = 9.525 mm. Entonces

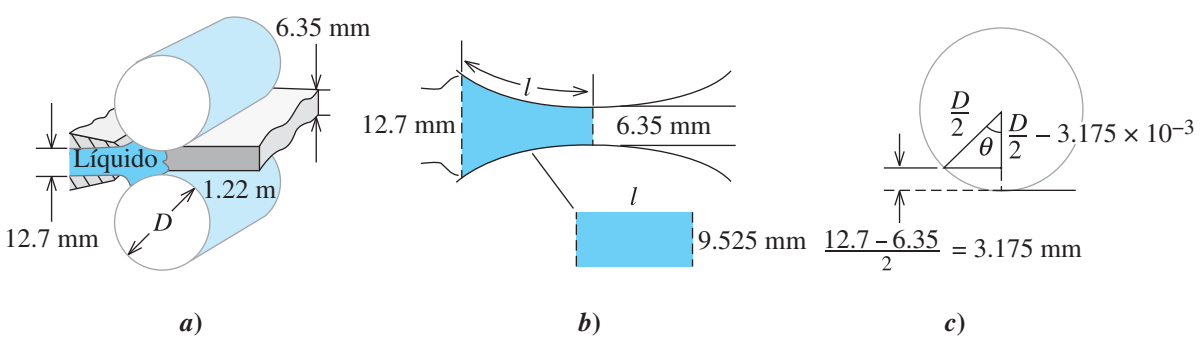


Figura 9-19 Colada continua horizontal de aluminio (ejemplo 9-8).

$$V = (\text{grosor})(\text{longitud})(\text{ancho}) = 9.525 \times 10^{-3} lw$$
$$A = 2(\text{longitud})(\text{ancho}) = 2lw$$
$$\frac{V}{A} = \frac{9.525 \times 10^{-3} lw}{2lw} = 4.763 \times 10^{-3}\ \text{m o } 4.763\ \text{mm}$$

Sólo el área en contacto directo con los rodillos se utiliza en la regla de Chvorinov, dado que se transfiere poco o ningún calor desde las demás superficies. El tiempo de solidificación debe ser

$$t_s = B\left(\frac{V}{A}\right)^2 = (4.65 \times 10^5)(4.763 \times 10^{-3})^2 = 10.55\ \text{s}$$

Para que la placa permanezca en contacto con los rodillos por este tiempo, deben especificarse de manera adecuada el diámetro y la velocidad de rotación de los rodillos. La figura 9-19*c*) muestra que el ángulo θ entre los puntos donde el líquido entra y sale de los rodillos es

$$\cos\theta = \frac{(D/2) - 3.175 \times 10^{-3}}{(D/2)} = \frac{D - 6.35 \times 10^{-3}}{D}$$

La velocidad superficial de los rodillos es el producto de su circunferencia y su rapidez de rotación, $v = \pi DR$, donde R tiene unidades de revoluciones/minuto. La velocidad v también es la velocidad a la que se puede producir la placa de aluminio. El tiempo que emplean los rodillos para recorrer la distancia l debe ser igual al tiempo de solidificación que se requiere:

$$t = \frac{l}{v} = 10.55\ \text{s}$$

La longitud l es la fracción del diámetro de los rodillos que está en contacto con el aluminio durante su solidificación y está dada por

$$l = \frac{\pi D\theta}{360}$$

Observe que θ tiene unidades de grados. Entonces, cuando se sustituye l y v en la ecuación del tiempo:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{\pi D\theta}{360\pi DR} = \frac{\theta}{360\ R} = 10.55\ \text{s}$$
$$R = \frac{\theta}{(360)(10.55)} = 2.633 \times 10^{-4}\,\theta\ \text{rev/s}$$

Varias combinaciones de D y R proporcionan la velocidad de solidificación que se requiere. Se calcula θ para varios diámetros y se encuentra la R que se requiere.

D (m)	θ (°)	l (mm)	$R = 2.633 \times 10^{-4}\theta$ (rev/s)	$v = \pi DR$ (mm/s)
0.61	8.28	43.94	3.45×10^{-5}	4.174
0.914	6.76	53.85	2.82×10^{-5}	5.122
1.22	5.85	62.23	2.42×10^{-5}	5.884
1.524	5.23	69.60	2.19×10^{-5}	6.604

A medida que se incrementa el diámetro de los rodillos, el área de contacto (l) entre los rodillos y el metal también lo hace. A su vez, este incremento permite una velocidad superficial (v) más rápida de los rodillos y aumenta la velocidad de producción de la placa. Observe que los rodillos con diámetro mayor no necesariamente giran muy rápido para lograr estas mayores velocidades.

Durante la selección del diseño final se prefiere utilizar el diámetro práctico de los rodillos lo más grande posible para asegurar una alta velocidad de producción. Sin embargo, a medida que los rodillos se hacen más grandes, sus precios y el de su equipo de soporte también lo hacen.

En la operación real de una colada continua podrían utilizarse mayores velocidades, dado que las placas no tienen que solidificarse por completo en el punto donde emerge de los rodillos.

9-11 Solidificación direccional [SD], crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial

Existen algunas aplicaciones para las que no se desea una estructura de granos equiaxiales pequeños en una pieza colada. Las piezas coladas que se usan para álabes y deflectores en motores de turbinas son un ejemplo de ello (figura 9-20). A menudo, estas piezas coladas se elaboran de superaleaciones basadas en titanio, cobalto o níquel que se fabrican mediante el vaciado por revestimiento de precisión.

Con frecuencia, las piezas coladas de manera convencional tienen una estructura de granos equiaxiales. Sin embargo, los álabes y los deflectores para motores de turbinas y jets fallan a lo largo de los límites de granos transversales. Se obtiene una mayor resistencia a la termofluencia y a la fractura cuando se emplea la técnica de crecimiento de **solidificación direccional** (**SD**). Durante el proceso de SD se calienta el molde desde un extremo y se enfría desde el otro, lo cual produce una microestructura columnar en la que todos los límites de los granos se mueven en la dirección longitudinal de la pieza. En la dirección transversal no se presentan límites de grano [figura 9-20*b*)].

Se obtienen propiedades aún mejores si se emplea la técnica de *monocristal* (MC). La solidificación de los granos columnares comienza de nuevo en una superficie fría; sin embargo, debido a la cavidad helicoidal en el molde entre el disipador de calor y la cavidad principal del molde, sólo un grano columnar es capaz de hacer crecer el cuerpo principal de la pieza colada [figura 9-20*c*)]. La pieza colada monocristalina no tiene límites de grano, por lo que sus planos y direcciones cristalográficas pueden dirigirse en una orientación óptima.

Crecimiento de monocristales

Una de las aplicaciones más importantes de la solidificación es el crecimiento de monocristales. Los materiales policristalinos no pueden utilizarse de manera eficaz en muchas aplicaciones electrónicas y ópticas. Los límites de los granos y otros defectos interfieren con los mecanismos que cumplen funciones eléctricas u ópticas útiles. Por ejemplo, para utilizar el comportamiento semiconductor del silicio dopado, deben utilizarse monocristales de alta pureza. La tecnología actual para trabajar el silicio usa monocristales grandes (de hasta 12 pulg de diámetro). Por lo general se hace crecer un cristal grande del material [figura 9-21*a*)], el que luego se corta en obleas de silicio que son de sólo unos milímetros de grosor [figura 9-21*b*)]. Los *procesos de Bridgman y Czochralski* son algunos de los métodos conocidos que se emplean para hacer crecer los monocristales de silicio, GaAs, niobato de litio ($LiNbO_3$) y muchos otros materiales.

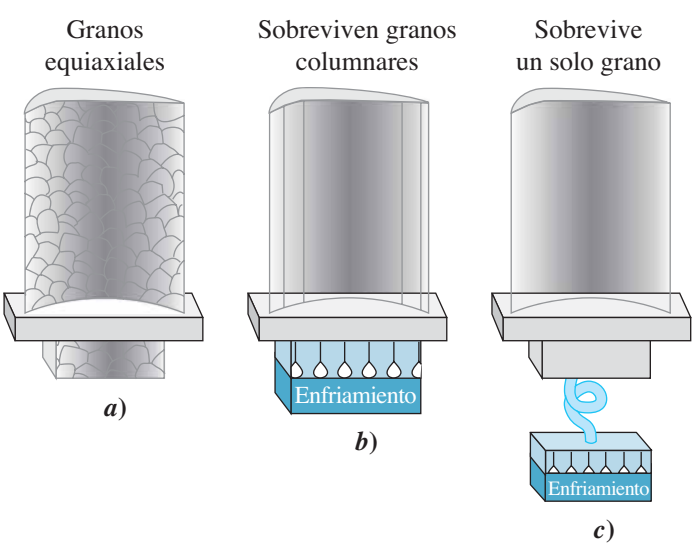


Figura 9-20 Control de la estructura de los granos en los álabes de turbinas: *a*) granos equiaxiales convencionales, *b*) granos columnares solidificados de manera direccional y *c*) monocristal.

a) ***b)***

Figura 9-21 *a*) Monocristal de silicio (*Peter Sobolev/Shutterstock.com*) y *b*) oblea de silicio (*Steve McAlister/Stockbyte/Getty Images*).

Los hornos de crecimiento de cristales que contienen materiales fundidos deben mantenerse a una temperatura precisa y estable. Con frecuencia, se utiliza como "semilla" un cristal pequeño con una orientación cristalográfica predeterminada. La transferencia de calor es controlada de tal manera que toda la fusión se cristaliza y forma un monocristal. Por lo general, los monocristales muestran propiedades considerablemente mejoradas, controlables y predecibles a un costo mayor al de los materiales policristalinos. Sin embargo, debido a su gran demanda, el costo de los monocristales puede no ser un factor significativo para el resto de los costos de procesamiento involucrados en la fabricación de dispositivos nuevos y útiles.

Crecimiento epitaxial

Es probable que exista más de un centenar de procesos para depositar materiales en películas finas. En algunos de estos procesos, existe una necesidad de controlar la textura u orientación cristalográfica del material policristalino que se está depositando; otros requieren una película monocristalina orientada en una dirección específica. Si este es el caso, se puede usar un sustrato de una orientación conocida. La epitaxia es el proceso por medio del cual se hace que un material crezca de una forma orientada utilizando un sustrato que coincida de manera cristalográfica con el material que se está haciendo crecer. Si la coincidencia de red entre el sustrato y la película es buena (dentro de una diferencia porcentual pequeña), es posible hacer crecer películas delgadas altamente orientadas o monocristalinas. A este fenómeno se le conoce como **crecimiento epitaxial**.

9-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos

Cuando se enfrían, muchos polímeros no se cristalizan, sino que se solidifican. En estos materiales puede existir la fuerza motriz termodinámica para su cristalización; sin embargo, la rapidez de formación de núcleos del sólido puede ser muy lenta o la complejidad de las cadenas de polímero puede ser tan grande que no se alcance a formar un sólido cristalino. La cristalización de los polímeros casi nunca se completa y es significativamente distinta de la que ocurre en el caso de los materiales metálicos, pues requieren que las cadenas de polímero grandes se ordenen de manera estrecha en distancias relativamente grandes. Cuando se concreta este proceso, el polímero crece en forma de cristales laminares, o parecidos a placas (figura 9-22). La región entre cada laminilla contiene cadenas de polímero arregladas de manera amorfa. Además, los conjuntos de laminillas crecen a partir de un núcleo común, pero la orientación cristalográfica de las laminillas dentro de un conjunto es distinta

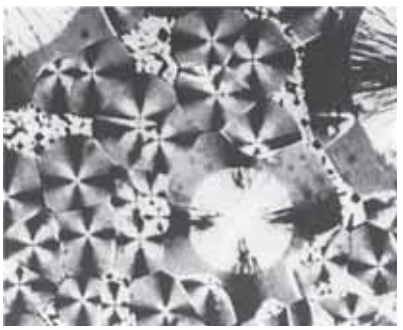


Figura 9-22 Esferulitas de una matriz amorfa de nailon (200 ×). (Structure and properties of engineering materials, *de Brick, R. M.; Derechos reservados 1977. Reproducido con la autorización de McGraw-Hill Companies, Inc.*)

de la que se encuentra en otro conjunto. A medida que los conjuntos crecen, pueden producir una forma esférica llamada **esferulita,** elemento compuesto por muchos conjuntos individuales de laminillas orientados de manera distinta. Se presentan regiones amorfas entre las laminillas individuales, los conjuntos de laminillas y las esferulitas individuales.

Numerosos polímeros de interés comercial suelen cristalizarse durante su procesamiento. La cristalinidad puede originarse a partir del enfriamiento, como ya se explicó, o debido a la aplicación de un esfuerzo. Por ejemplo, se ha explicado que las botellas de plástico PET se fabrican mediante el proceso de soplado-estiramiento (capítulo 3) y que pueden desarrollar una cristalinidad considerable durante su formación. Esta cristalización es resultado de la aplicación de un esfuerzo y, por lo tanto, es diferente de la que se produce durante la solidificación de metales y aleaciones. En general, los polímeros como el nailon y el polietileno se cristalizan con más facilidad que muchos otros termoplásticos.

Los vidrios inorgánicos, como los de silicato, tampoco se cristalizan con facilidad por razones cinéticas. Mientras exista la fuerza motriz termodinámica, de manera similar a la solidificación de metales y aleaciones, con frecuencia las fundiciones son muy viscosas y la difusión es demasiado lenta para que proceda la cristalización durante la solidificación. El proceso de vidrio flotado se emplea para fundir y colar piezas planas y grandes de vidrio. En este proceso se hace que el vidrio fundido flote sobre estaño fundido. Como se explicó en el capítulo 7, dado que la resistencia de los vidrios inorgánicos depende de manera crítica de las imperfecciones superficiales que se producen durante el proceso de fabricación o por la reacción con la humedad atmosférica, la mayoría de los vidrios se fortalece por medio del templado. Cuando la seguridad no es una preocupación primaria, se utiliza el recocido para reducir esfuerzos. Como ya se mencionó, el control cuidadoso de la formación de núcleos en los vidrios puede conducir a la producción de vidrios-cerámicos, vidrios de colores y vidrios fotocrómicos (vidrios que pueden cambiar su color o polarizarse cuando son expuestos a la luz del sol).

9-13 Unión de materiales metálicos

Cuando se recurre a la **soldadura fuerte**, se utiliza una aleación, conocida como relleno, para unir un metal a sí mismo o a otro. El metal de relleno de la soldadura fuerte tiene una temperatura de fusión por encima de 450°C. La **soldadura blanda** es un proceso de soldadura fuerte cuyo relleno tiene una temperatura de fusión por debajo de los 450°C. Las aleaciones de plomo-estaño y antimonio-estaño son los materiales que más se utilizan para la soldadura blanda. En la actualidad se están desarrollando materiales para soldadura blanda libres de plomo, debido a su toxicidad, como las basadas en Sn-Cu-Ag. En ambos tipos de soldadura, los materiales que se desea unir no se funden; sólo se funde el material de relleno. Tanto en el caso de la soldadura fuerte como en el de la soldadura blanda, la composición del material de relleno es diferente de la del material base que se está uniendo. En el caso de la soldadura fuerte se utilizan varios metales de aluminio-silicio, cobre, magnesio y preciosos.

La solidificación también es importante para unir metales a través de la **soldadura por fusión,** en cuyo caso se funde una parte de los metales que se unirán y, en algunos casos, se adiciona un metal fundido de relleno. Al estanque de metal líquido se le llama **zona de fusión** (figuras 9-23 y 9-24). Cuando después la zona de fusión se solidifica, las piezas originales de metal se unen entre sí. Durante

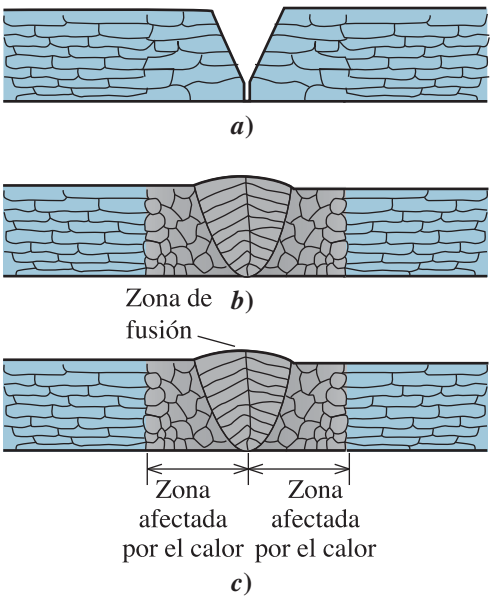


Figura 9-23 Diagrama esquemático de la zona de fusión y la solidificación de la soldadura durante la soldadura por fusión: *a*) unión preparada inicialmente, *b*) soldadura a temperatura máxima, con la unión rellenada con el metal de relleno y *c*) soldadura después de la solidificación.

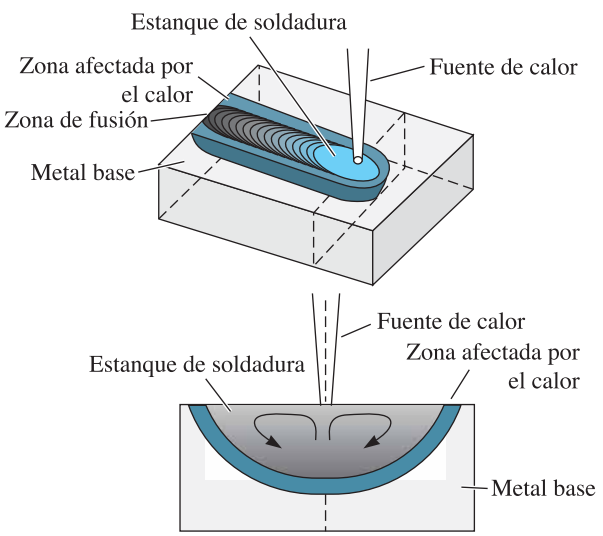


Figura 9-24 Diagrama esquemático que muestra la interacción entre la fuente de calor y el metal base. Las tres regiones distintas en la soldadura son la zona de fusión, la zona afectada por el calor y el metal base. (*Basada en "Current Issues and Problems in Welding Science", de S.A. David y T. DebRoy, 1992, en* Science*, vol. 257, núm. 5069, pp. 497-502*.)

la solidificación de dicha zona, no se requiere formación de núcleos. Simplemente, el sólido comienza a crecer a partir de los granos existentes, con frecuencia de manera columnar.

La estructura y las propiedades de la zona de fusión dependen de muchas de las mismas variables que en una pieza colada metálica. La adición de agentes inoculantes a la zona de fusión reduce el tamaño de los granos. Las altas velocidades de enfriamiento o los tiempos cortos de solidificación promueven una microestructura más fina y mejores propiedades. Los factores que incrementan la velocidad de enfriamiento incluyen el aumento del grosor del metal, zonas de fusión más pequeñas, temperaturas del metal original bajas y ciertos tipos de procesos de soldadura. Por ejemplo, la soldadura con oxiacetileno utiliza una fuente de calor con una intensidad relativamente baja: en consecuencia, los tiempos de soldadura son largos y el metal sólido circundante, el cual se calienta enormemente, no es un disipador eficaz de calor. Los procesos de soldadura por arco proporcionan una fuente más intensa de calor, por lo que reducen el calentamiento del metal circundante y permiten un enfriamiento más rápido. Las soldaduras con láser y con haz de electrones son fuentes de calor excepcionalmente intensas y producen velocidades de enfriamiento muy altas y soldaduras potencialmente resistentes. Se ha desarrollado el proceso de soldadura de agitación con fricción para aleaciones de Al y Al-Li para aplicaciones aeroespaciales.

Resumen

- La transformación de un líquido en un sólido es tal vez la transformación de fase más importante en las aplicaciones de la ciencia e ingeniería de los materiales.
- La solidificación desempeña una función crucial en el procesamiento de metales, aleaciones, termoplásticos y vidrios inorgánicos. También es importante en las técnicas que se utilizan para unir materiales metálicos.
- La formación de núcleos o nucleación produce una partícula sólida de tamaño crítico a partir de la fusión líquida. La formación de núcleos es determinada por la fuerza motriz termodinámica de la solidificación y a ella se opone la necesidad de crear una interfase sólido-líquido. Como resultado, la solidificación puede no ocurrir a la temperatura de solidificación.
- La nucleación homogénea requiere subenfriamientos grandes del líquido, lo que no se observa en el procesamiento normal de solidificación. Cuando se introducen partículas extrañas en el líquido, se proporcionan núcleos para la nucleación heterogénea. En la práctica, este proceso se realiza por medio de la inoculación o refinamiento de los granos. Este proceso permite el control del tamaño de los granos de la pieza colada.
- El enfriamiento rápido del líquido puede prevenir la formación de núcleos y el crecimiento, pero produce sólidos, o vidrios, amorfos con propiedades mecánicas y físicas inusuales. Los materiales poliméricos, metálicos e inorgánicos pueden fabricarse en forma de vidrios amorfos.
- En la solidificación a partir de fusiones, los núcleos crecen en la fusión líquida. Pueden observarse modos de crecimiento planares o dendríticos. En el crecimiento planar crece una interfase sólido-líquido lisa con poco o ningún subenfriamiento del líquido. Los procesos de solidificación direccional especial aprovechan el crecimiento planar. El crecimiento dendrítico ocurre cuando el líquido se subenfría. El enfriamiento rápido, o un tiempo corto de solidificación, produce una estructura dendrítica más fina y con frecuencia conduce a mejorar las propiedades mecánicas de una pieza colada metálica.
- La regla de Chvorinov, $t_s = B(V/A)^n$, puede utilizarse para calcular el tiempo de solidificación de una pieza colada.
- Las curvas de enfriamiento indican la temperatura de vertido, cualquier subenfriamiento y recalescencia, y el tiempo de solidificación.
- El control de la formación de núcleos y el crecimiento pueden darle a una pieza colada una estructura de granos columnares, equiaxiales, o una mezcla de las dos. El comportamiento isotrópico es común de los granos equiaxiales, mientras que el comportamiento anisotrópico se encuentra en los granos columnares.
- La porosidad y la contracción por cavidades son los defectos principales que pueden presentarse en los productos colados. Si se presentan, pueden provocar que éstos fallen de manera catastrófica.
- En los métodos comerciales de procesamiento de solidificación, los defectos en una pieza colada (como la contracción por solidificación o la porosidad gaseosa) pueden controlarse por medio del diseño apropiado del sistema de colado y de la mazarota, o mediante el tratamiento apropiado del metal líquido antes de su vertido.
- El vaciado en arena, el colado por revestimiento y el colado en matriz a presión son algunos de los procesos para colar componentes. El vaciado de lingotes y la colada continua se emplean para producir y reciclar metales y aleaciones.
- Los procesos de solidificación pueden controlarse con cuidado para producir materiales solidificados en forma direccional al igual que monocristales. Los procesos epitaxiales utilizan la coincidencia de la estructura cristalina entre el sustrato y el material que se está haciendo crecer y son útiles para fabricar dispositivos electrónicos y otros.

Glosario

Acero inoxidable Grupo de aleaciones ferrosas que contiene por lo menos 11% de Cr, lo que le proporciona una resistencia extraordinaria a la corrosión.

Aleaciones de formación de corteza Aleaciones cuya microestructura muestra una corteza externa de granos pequeños en la zona de enfriamiento seguida por dendritas.

Aleaciones de formación de pasta Aleaciones con una macroestructura fundida que consiste de manera predominante en granos equiaxiales. Se les conoce así, dado que el material fundido es similar a una pasta de granos sólidos que flota en una fusión líquida.

Calor específico Calor requerido para modificar la temperatura de una unidad de peso del material en un grado.

Calor latente de fusión Calor liberado cuando se solidifica un líquido. El calor latente de fusión está relacionado con la diferencia en energía entre el sólido y el líquido.

Cavidades Orificios pequeños presentes en una pieza colada.

Colada continua Proceso para convertir un metal o una aleación fundida en un producto semiterminado, como un bloque, por ejemplo.

Colado por revestimiento Proceso de fundición que se emplea para fabricar formas complejas como álabes de turbinas, también conocido como proceso a la cera perdida.

Constante del molde Constante característica de la regla de Chvorinov.

Contracción Contracción de una pieza colada durante la solidificación.

Contracción interdendrítica Poros pequeños entre los brazos de dendritas formados por la contracción que acompaña la solidificación. También conocido como microcontracción o porosidad por contracción.

Contracción por cavidades Vacío grande dentro de una pieza colada ocasionado por la contracción del volumen que ocurre durante la solidificación.

Contracción por rechupes Vacío grande de forma cónica en la superficie de una fundición ocasionada por la contracción del volumen que ocurre durante la solidificación.

Crecimiento Proceso físico por medio del cual una nueva fase aumenta de tamaño. En el caso de la solidificación, se refiere a la formación de un sólido estable a medida que el líquido se solidifica.

Crecimiento epitaxial Crecimiento de una película delgada monocristalina sobre un sustrato monocristalino que coincide de manera cristalográfica.

Crecimiento planar Crecimiento de una interfase sólido-líquido lisa durante la solidificación cuando no se presenta subenfriamiento del líquido.

Dendrita Estructura parecida a un árbol del sólido que crece cuando se solidifica un líquido subenfriado.

Descarburización con oxígeno y argón Proceso para refinar el acero inoxidable. El carbono disuelto en el acero inoxidable fundido es reducido mediante una corriente de gas argón mezclado con oxígeno.

Embrión Partícula del sólido que se forma a partir del líquido a medida que los átomos se aglomeran. El embrión puede crecer en un núcleo estable o disolverse nuevamente.

Endurecimiento de segunda fase Vea endurecimiento por dispersión.

Endurecimiento por dispersión Incremento de la resistencia de un material metálico cuando se provoca una resistencia al movimiento de las dislocaciones por medio de la introducción de aglomerados pequeños de un segundo material. (También llamado endurecimiento de segunda fase.)

Esferulitas Cristales de forma esférica que se producen cuando se solidifican ciertos polímeros.

Espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios Distancia entre los centros de dos brazos dendríticos secundarios adyacentes.

Estructura de lingote Macroestructura de una fundición, que incluye las zonas de enfriamiento, columnar y equiaxial.

Frente de solidificación Interfase entre un sólido y un líquido.

Fundición en matriz a presión Proceso de fundición en el que se fuerza un metal fundido en una matriz bajo presión.

Fundición en molde permanente Proceso de fundición en el que se usa varias veces un molde.

Inoculación Adición de núcleos heterogéneos de manera controlada para incrementar el número de granos en una pieza colada.

Inoculantes Materiales que proporcionan sitios de nucleación heterogénea durante la solidificación de un material.

Interrupción térmica Meseta de la curva de enfriamiento durante la solidificación de un material provocada por la evolución del calor latente de fusión durante la solidificación. Esta generación de calor balancea el calor que se está perdiendo como resultado del enfriamiento.

Laminar Arreglo parecido a una placa de cristales dentro de un material.

Lavado con gas Proceso en el que se inyecta una corriente de gas en un metal fundido para eliminar un gas disuelto que podría provocar porosidad.

Ley de Sievert La cantidad de un gas que se disuelve en un metal es proporcional a la raíz cuadrada de la presión parcial del gas en los alrededores.

Lingote Pieza colada simple que por lo general se funde o se procesa nuevamente por otro usuario para producir una forma más útil.

Mazarota Reserva adicional de metal líquido conectado a una pieza colada. Si después de la colada se solidifica la mazarota, esta puede proveer metal líquido para compensar la contracción.

Microcontracción Poros pequeños, con frecuencia aislados entre los brazos de dendritas formados por la contracción que acompaña la solidificación. También se le conoce como microcontracción o porosidad por contracción.

Nucleación Proceso físico por medio del cual se produce una nueva fase en un material. En el caso de la solidificación, se refiere a la formación de partículas sólidas pequeñas y estables en el líquido.

Nucleación heterogénea Formación de un sólido de tamaño crítico a partir del líquido en una superficie con impurezas.

Nucleación homogénea Formación de un sólido de tamaño crítico a partir de líquido debido a la aglomeración de un gran número de átomos a un subenfriamiento alto (sin una interfase externa).

Núcleos Partículas pequeñas del sólido que se forman a partir del líquido a medida que los átomos se aglomeran. Debido a que estas partículas son lo suficientemente grandes para ser estables, puede comenzar el crecimiento del sólido.

Porosidad gaseosa Burbujas de gas atrapadas dentro de una pieza colada durante la solidificación, ocasionadas por la solubilidad menor del gas en el sólido en comparación con la del líquido.

Porosidad por contracción Poros pequeños entre los brazos de dendritas formados por la contracción que acompaña la solidificación. También se le conoce como microcontracción o porosidad interdendrítica.

Procesamiento de solidificación rápida Producción de estructuras únicas de los materiales cuando se promueven velocidades de enfriamiento inusualmente altas durante la solidificación.

Procesamiento primario Proceso que involucra al colado de metales fundidos en lingotes o formas útiles semiterminadas como bloques.

Procesamiento secundario Proceso como el laminado, la extrusión, etc., empleados para procesar lingotes o bloques y otras formas semiterminadas.

Proceso a la cera perdida Proceso en el que se usa un patrón de cera para colar un metal.

Proceso a la espuma perdida Proceso en el que se usa una espuma de polímero como un patrón para producir una pieza colada.

Proceso de solidificación Procesamiento de materiales que involucra solidificación (por ejemplo, el crecimiento de monocristales, la colada continua, etcétera).

Radio crítico Tamaño mínimo que debe ser formado por los átomos aglomerados en el líquido antes de que la partícula sólida se estabilice y comience a crecer.

Recalescencia Incremento de la temperatura de un metal líquido subenfriado que se produce como resultado de la liberación de calor durante la formación de núcleos.

Refinación de granos Adición de núcleos heterogéneos de manera controlada para incrementar el número de granos en una pieza colada.

Regla de Chvorinov El tiempo de solidificación de una pieza colada es directamente proporcional al cuadrado de la razón volumen a área de superficie de la pieza colada.

Sobrecalentamiento Diferencia entre la temperatura del vertido y la temperatura de solidificación.

Soldadura blanda La soldadura es un proceso de unión en que el material relleno o de aporte tiene una temperatura de fusión por debajo de los 450°C y no ocurre la fusión de los materiales base.

Soldadura fuerte En este caso se utiliza una aleación, conocida como material relleno o de aporte, para unir dos materiales. La composición del relleno, el cual tiene una temperatura de fusión por encima de 450°C, es bastante distinta de la del metal que se desea uniendo.

Soldadura por fusión Proceso de unión en el que debe fundirse una porción de los materiales para lograr una buena unión.

Solidificación direccional Técnica de solidificación en la que el enfriamiento en una dirección dada provoca el crecimiento preferencial de los granos en la dirección opuesta, lo que genera una microestructura orientada y anisotrópica.

Subenfriamiento Temperatura a la que debe enfriarse el metal líquido por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio antes de que ocurra la formación de núcleos.

Tiempo de solidificación local Tiempo que se requiere para que una parte en particular de una pieza colada se solidifique una vez que ha comenzado la formación de núcleos.

Tiempo de solidificación total Tiempo que se requiere para que una pieza colada se solidifique por completo después de que se ha vertido.

Transformación de fase en estado sólido Cambio de fase que ocurre en el estado sólido.

Vaciado de lingotes Solidificación de un metal fundido en un molde de forma sencilla. Después, el metal requiere una deformación plástica extensiva para crear un producto terminado.

Vaciado en arena Proceso de fundición que usa moldes de arena.

Vidrio fotocrómico Vidrio que cambia de color o de matiz cuando se lo expone a la luz del sol.

Vidrios-cerámicos Materiales cerámicos policristalinos con granos ultrafinos que se obtienen por medio de la cristalización controlada de vidrios amorfos.

Zona columnar Región de granos alargados que tienen una orientación preferida que se forma como resultado del crecimiento competitivo durante la solidificación de una pieza colada.

Zona de enfriamiento Región de granos pequeños orientados de manera aleatoria que se forma en la superficie de una pieza colada como resultado de la nucleación heterogénea.

Zona de fusión Parte de una soldadura calentada para producir sólo líquido durante el proceso de soldadura. La solidificación de la zona de fusión proporciona la unión.

Zona equiaxial Región de granos orientados de manera aleatoria en el centro de una pieza colada que se produce como resultado de la formación extendida de núcleos.

Problemas

Sección 9-1 Importancia tecnológica

9-1 Proporcione ejemplos de materiales basados en vidrios inorgánicos que se formen por solidificación.

9-2 ¿A qué se refieren los términos "procesamiento primario" y "secundario"?

9-3 ¿Por qué los materiales cerámicos no se preparan por medio de fusión y vaciado?

Sección 9-2 Formación de núcleos

9-4 Defina los siguientes términos: formación de núcleos (nucleación), embrión, formación de núcleos heterogénea y formación de núcleos homogénea.

9-5 ¿Cuál es la diferencia entre la formación de núcleos homogénea y la formación de núcleos heterogénea?

9-6 ¿Cuáles son los dos fenómenos que deben ocurrir para que se pueda producir la solidificación de un líquido desde el punto de vista de la termodinámica?

9-7 ¿El agua se congela a 0°C y hierve a 100°C? Explique su respuesta.

9-8 ¿El hielo se fusiona a 0°C? Explique su respuesta.

9-9 Determine la fórmula de la velocidad del cambio en el cambio total de energía como función del radio r del núcleo sólido (es decir, la derivada de ΔG en relación con r). Comience por la ecuación 9-1. ¿Cómo se define numéricamente el punto crítico de solidificación?

9-10 Utilice la ecuación 9-2 para demostrar que la energía interfacial (σ_{sl}) tiene unidades de J/m^2 en sólido-líquido.

9-11 Calcule la energía total de superficie interfacial de 10^6 esferas de cobre, cada una con el radio crítico r*.

9-12 ¿Cuál de los elementos férreos requiere menor subenfriamiento para formar núcleos homogéneos? ¿Esto tiene algún significado práctico?

9-13 Proporcione una aproximación del radio del primer sólido esférico estable si el cambio total en la energía libre para formar el primer sólido estable de un metal fundido es de 5.24×10^{-17} J y la unidad por volumen de energía libre es -17.7 MJ/m^3. La energía libre de la superficie de la interfase sólido-líquido es de 100×10^{-3} J/m^2.

9-14 Utilice las densidades del apéndice A para convertir las temperaturas de solidificación de la tabla 9-1 de J/cm^3 a kJ/kg.

9-15 Suponga que en vez de un núcleo esférico se tuviese un núcleo en forma de un cubo de longitud x. Calcule la dimensión crítica x* del cubo necesaria para formar núcleos. Escriba una ecuación similar a la ecuación 9-1 de un núcleo cúbico y deduzca la expresión de x* similar a la ecuación 9-2.

9-16 ¿Por qué se requiere un subenfriamiento para la solidificación? Deduzca una ecuación que muestre el cambio en la energía libre total como una función del subenfriamiento cuando el sólido que se está nucleando tiene un radio crítico del núcleo r*.

9-17 ¿Por qué los núcleos vistos de manera experimental con frecuencia son esferoidales pero con facetas? ¿Por qué parecen esferas y no cubos u otras formas?

9-18 Explique el significado de cada término de la ecuación 9-2.

9-19 Suponga que se subenfría níquel líquido hasta que ocurre la nucleación homogénea. Calcule
a) el radio crítico del núcleo que se requiere y
b) el número de átomos de níquel en el núcleo.
Suponga que el parámetro de red del níquel CCCa sólido es de 0.356 nm.

9-20 Suponga que se subenfría hierro líquido hasta que ocurre la nucleación homogénea. Calcule
a) el radio crítico del núcleo que se requiere y
b) el número de átomos de hierro en el núcleo.
Suponga que el parámetro de red del hierro CCCu sólido es de 2.92 Å.

9-21 Suponga que el níquel sólido fue capaz de nuclearse de manera homogénea con un subenfriamiento de sólo 22°C. ¿Cuántos átomos tendrían que agruparse de manera espontánea para que ocurra este fenómeno? Suponga que el parámetro de red del níquel CCCa sólido es de 0.356 nm.

9-22 Suponga que el hierro sólido puede nuclearse de manera homogénea con un subenfriamiento de sólo 15°C. ¿Cuántos átomos tendrían que agruparse de manera espontánea para que esto ocurra? Suponga que el parámetro de red del hierro CCCu sólido es de 2.92 Å.

Sección 9-3 Aplicaciones de la nucleación controlada

9-23 Explique el término inoculación.

9-24 Explique cómo pueden endurecerse las aleaciones de aluminio utilizando pequeñas adiciones de titanio y boro.

9-25 Compare y contraste los mecanismos del endurecimiento por tamaño de granos y del endurecimiento por deformación.

9-26 ¿Qué es un endurecimiento de segunda fase?

9-27 ¿Por qué muchas fusiones inorgánicas se solidifican en materiales amorfos con mayor facilidad en comparación con los materiales metálicos?

9-28 ¿Qué es un vidrio-cerámico? ¿Cómo se elaboran los vidrios-cerámicos?

9-29 ¿Qué es un vidrio fotocrómico?

9-30 ¿Qué es un vidrio metálico?

9-31 ¿Cómo forman nieve las máquinas en los lugares de temporada de esquí?

Sección 9-4 Mecanismos de crecimiento

9-32 ¿Cuáles son las dos etapas encontradas en la solidificación de metales fundidos? Como una función del tiempo, ¿pueden superponerse entre sí?

9-33 Durante la solidificación se requiere eliminar el calor específico del material y el calor latente de fusión. Defina cada uno de estos términos.

9-34 Describa en qué condiciones se espera que los metales fundidos experimenten solidificación dendrítica.

9-35 ¿Qué son las dendritas y por qué se forman durante el proceso de solidificación?

9-36 Utilice la información de la tabla 9-1 y sobre el calor específico dada abajo para calcular el

subenfriamiento que se requiere a fin de mantener la fracción dendrítica a 0.5 para cada metal.

Metal	Calor específico [MJ/(m^3 · K)]
Bi	1.27
Pb	1.47
Cu	3.48
Ni	4.75

9-37 Calcule la fracción de solidificación que ocurre de manera dendrítica cuando la plata se nuclea
a) a un subenfriamiento de 10°C;
b) a un subenfriamiento de 100°C, y
c) de manera homogénea.
El calor específico de la plata es de 3.25 MJ/(m^3 · °C).

9-38 Calcule la fracción de solidificación que ocurre de manera dendrítica cuando el hierro se nuclea
a) a un subenfriamiento de 10°C;
b) a un subenfriamiento de 100°C, y
c) de manera homogénea.
El calor específico del hierro es de 5.78 MJ/(m^3 · °C).

9-39 El análisis de una pieza colada de níquel sugiere que 28% del proceso de solidificación se produjo de manera dendrítica. Calcule la temperatura a la que ocurrió la formación de núcleos. El calor específico del níquel es de 4.1 MJ/(m^3 · °C).

9-40 Se desea incrementar la fracción dendrítica de 0.012 a 0.025. Suponga que el calor específico del metal que se solidificará es constante y determine el incremento de la cantidad de subenfriamiento que se requiere.

Sección 9-5 Tiempo de solidificación y tamaño dendrítico

9-41 Escriba la regla de Chvorinov y explique el significado de cada término.

9-42 Encuentre la constante del molde B y el exponente *n* en la regla de Chvorinov utilizando la siguiente información y una gráfica log-log:

Forma	Dimensiones (mm)	Tiempo de solidificación (s)
Cilindro	Radio = 100, Longitud = 300	5000
Esfera	Radio = 90	1800
Cubo	Longitud = 60	200
Placa	Longitud = 300, Ancho = 200, Altura = 10	40

9-43 Un cubo de 50.8 mm se solidifica en 276 s. Suponga $n = 2$. Calcule
a) la constante del molde en la regla de Chvorinov y
b) el tiempo de solidificación de una barra de 12.7 mm × 12.7 mm × 152.4 mm colada en las mismas condiciones.

9-44 Una esfera de 5 cm de diámetro se solidifica en 1,050 s. Calcule el tiempo de solidificación de una placa de 3 mm × 100 mm × 200 mm colada en las mismas condiciones. Suponga que $n = 2$.

9-45 Encuentre las constantes B y *n* de la regla de Chvorinov graficando la siguiente información en una gráfica log-log:

Dimensiones del colado (mm)	Tiempo de solidificación (s)
12.7 × 203.2 × 305	208.8
50.8 × 76.2 × 254	946.8
63.5 cube	610.2
25.4 × 101.2 × 228.6	487.8

9-46 Encuentre las constantes B y *n* de la regla de Chvorinov graficando la siguiente información en una gráfica log-log:

Dimensiones del colado (mm)	Tiempo de solidificación (s)
10 × 10 × 60	28.58
20 × 40 × 40	98.30
40 × 40 × 40	155.89
80 × 60 × 50	306.15

9-47 Se produjo una pieza colada de 3 pulg de diámetro. Se midieron los tiempos que se requerían para que la interfase sólido-líquido alcanzara diferentes distancias debajo de la superficie de la pieza colada, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Distancia de la superficie (mm)	Tiempo (s)
2.54	32.6
7.62	73.5
12.70	130.6
19.05	225.0
25.4	334.9

Determine
a) el tiempo en el que comenzó la solidificación en la superficie y
b) el tiempo en el que se espera que toda la pieza se solidifique.

c) Suponga que el centro de la pieza en realidad se solidificó en 720 s. Explique por qué este tiempo podría diferir del tiempo que calculó en el inciso *b*).

9-48 ¿Qué tiempo de solidificación será necesario para un colado de $9.5 \times 10^{-6} m^3$ y un área de contacto de molde de 1×10^{-3} m^2? La constante del molde es 8.38×10^6 s/m^2.

9-49 Una placa de aleación de aluminio con dimensiones de 200 mm × 100 mm × 20 mm necesita colarse con un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios de 0.1 mm (remítase a la figura 9-6). ¿Qué constante del molde B se requiere (suponga que $n = 2$)?

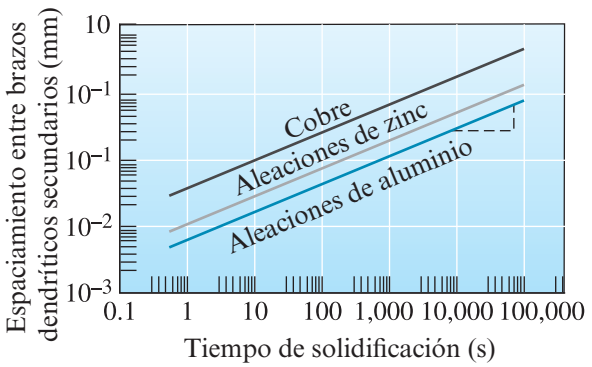


Figura 9-6 Efecto del tiempo de solidificación sobre los espaciamientos entre brazos dendríticos secundarios del cobre, zinc y aluminio. (Repetida para el problema 9-49.)

9-50 La figura 9-5*b*) muestra una micrografía de una aleación de aluminio. Calcule

a) el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios y

b) el tiempo de solidificación local del área de la fundición.

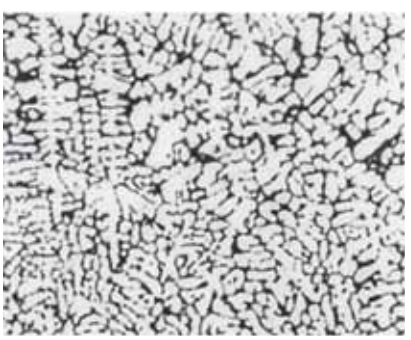


Figura 9-5 *b*) Dendritas de una aleación de aluminio (50 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con permiso de ASM International. Todos los derechos reservados, www.asminternational.org*.]

9-51 Determine las constantes k y m que relacionan el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios con el tiempo de solidificación local graficando la siguiente información en una gráfica log-log:

Tiempo de solidificación (s)	EBDS (mm)
156	0.176
282	0.216
606	0.282
1356	0.374

9-52 La figura 9-25 muestra las dendritas de una partícula de polvo de titanio que se ha solidificado de manera rápida. Suponiendo que el tamaño de las dendritas de titanio está relacionado con el tiempo de solidificación por medio de la misma relación que en el aluminio, calcule el tiempo de solidificación de la partícula de polvo.

9-53 El espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios en una soldadura de cobre con haz de electrones es de 9.5×10^{-3} mm. Calcule el tiempo de solidificación de la soldadura.

9-54 Una aleación de zinc tiene un EBDS de 0.1 mm y m = 0.40. ¿Cuál es su tiempo de solidificación?

9-55 En la figura 9-7, ¿cuál sería la ecuación de la línea de resistencia a la tensión (en forma de in-

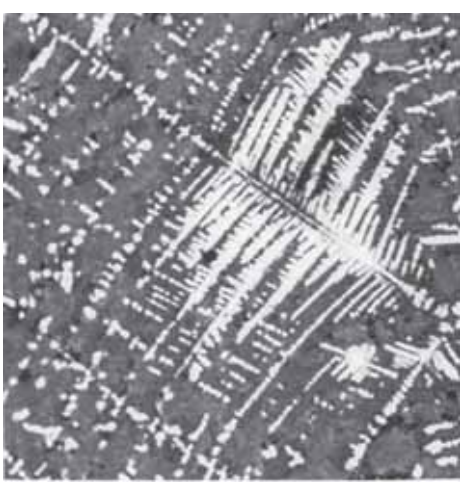


Figura 9-25 Dendritas de una partícula de polvo de titanio producidas por el procesamiento de solidificación rápida (2200 ×) (problema 9-52). (*Springer and The Metallurgical of Society of AIME,* Metallurgical Transaccions, *vol.15 A, junio de 1984, pp. 1117-1127, "Formation of metal Carbide Powder by Spark Machining of Reactive Metals," J.D. Ayers and K. Moore, figura número (s). Derechos reservados© 1984, The Metallurgical of Society of AIME. Con el amable permiso de from Springer Science and Business Media.*)

tersección de la pendiente) y cuál debería ser la EBDS para obtener una resistencia a la tensión de cero si la línea se extrapola? ¿Tiene sentido extrapolar una tendencia así?

Sección 9-6 Curvas de enfriamiento

9-56 Trace la curva de enfriamiento de un metal puro y etiquete con cuidado las distintas regiones.

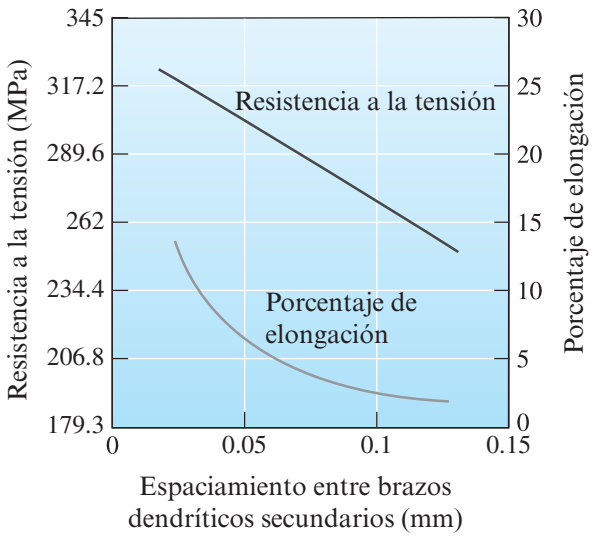


Figura 9-7 Efecto del espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación fundida de aluminio. (Repetida para el problema 9-55.)

9-58 ¿Qué es la interrupción térmica?

9-59 ¿Qué significan los términos tiempos de "solidificación total" y "local"?

9-60 ¿Qué representan las pendientes de las líneas *A-B* y *E-* adelante en la figura 9-8? ¿Representan estas cantidades a propiedades físicas?

9-61 En la figura 9-26 se muestra una curva de enfriamiento.
Determine:
a) la temperatura del vertido;
b) la temperatura de solidificación;
c) el sobrecalentamiento;
d) la velocidad de enfriamiento, justo antes de que comience la solidificación;
e) el tiempo de solidificación total;
f) el tiempo de solidificación local, y
g) la identidad probable del metal.
h) Si la curva de enfriamiento se obtuvo en el centro de la pieza colada representado en la figura, determine la constante del molde, suponiendo que $n = 2$.

9-62 En la figura 9-27 se muestra una curva de enfriamiento. Determine:
a) la temperatura del vertido;
b) la temperatura de solidificación;
c) el sobrecalentamiento;
d) la rapidez de enfriamiento, justo antes de que comience la solidificación;

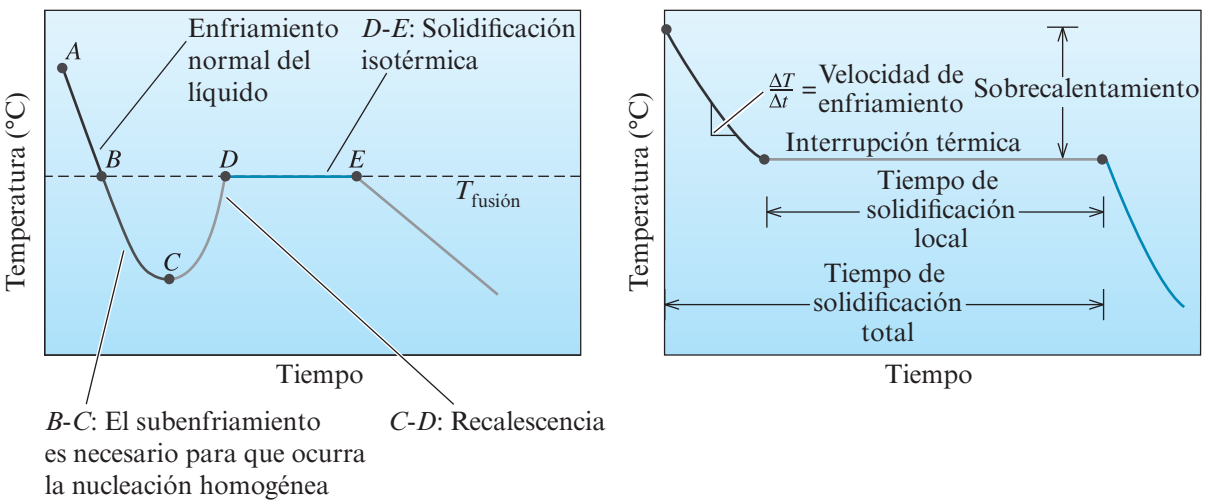


Figura 9-8 *a*) Curva de enfriamiento de un metal puro que no ha sido bien inoculado. El líquido se enfría a medida que se elimina el calor específico (entre los puntos *A* y *B*). Por lo tanto, es necesario el subenfriamiento (entre los puntos *B* y *C*). A medida que comienza la formación de núcleos (punto *C*), se libera el calor latente de fusión y ocasiona un incremento de la temperatura del líquido. A este proceso se le conoce como recalescencia (punto *C* al *D*). El metal continúa solidificándose a una temperatura constante ($T_{fusión}$). En el punto *E*, se completa la solidificación. La pieza colada sólida continúa enfriándose desde este punto. *b*) Curva de enfriamiento de un metal bien inoculado, que de otra manera sería puro. No se necesita subenfriamiento. No se observa recalescencia. La solidificación comienza a la temperatura de fusión. (Repetida para el problema 9-61.)

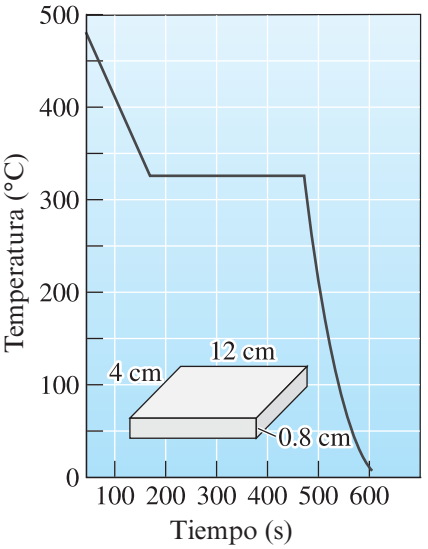


Figura 9-26 Curva de enfriamiento (problema 9-61).

e) el tiempo de solidificación total;
f) el tiempo de solidificación local;
g) el subenfriamiento, y
h) la identidad probable del metal.
i) Si la curva de enfriamiento se obtuvo en el centro de la pieza colada representado en la figura, determine la constante del molde, suponiendo que $n = 2$.

9-63 La figura 9-28 muestra las curvas de enfriamiento obtenidas a partir de varias localizaciones dentro de una pieza colada cilíndrica de aluminio. Determine los tiempos de solidificación locales y el EBDS en cada lugar, después

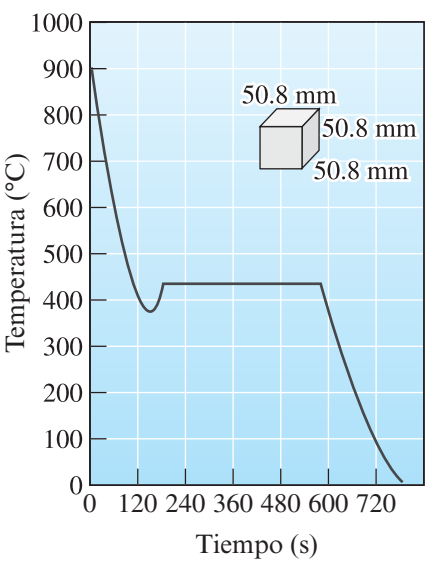


Figura 9-27 Curva de enfriamiento (problema 9-62).

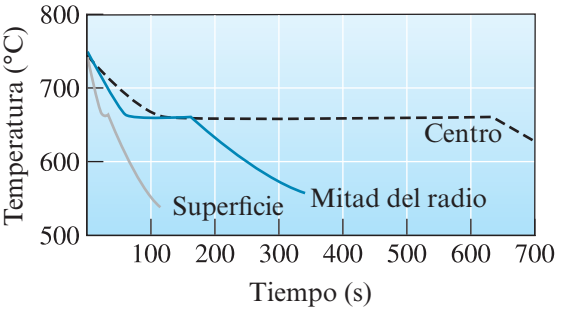


Figura 9-28 Curvas de enfriamiento (para el problema 9-63).

grafique la resistencia a la tensión en función de la distancia de la superficie de la pieza colada. ¿Recomendaría que se diseñe la pieza colada de tal manera que deba maquinarse una cantidad de material grande o pequeña de la superficie durante el acabado? Explique su respuesta.

Sección 9-7 Estructura de la pieza colada

9-64 ¿Cuáles son las características esperadas de la macroestructura de un componente colado? Explique por medio de una representación.

9-65 En los materiales colados, ¿por qué la solidificación casi siempre comienza en las paredes del molde?

9-66 ¿Por qué los componentes forjados no muestran una estructura de lingote vaciado?

Sección 9-8 Defectos de solidificación

9-67 ¿Qué tipo de defecto en una pieza colada puede provocar la falla catastrófica de los componentes colados como los álabes de turbinas? ¿Qué precauciones se toman para evitar la porosidad en las piezas coladas?

9-68 En general, en comparación con los componentes preparados mediante forjado, laminado, extrusión, etc., los productos colados tienden a tener una menor tenacidad a la fractura. Explique por qué puede ser este el caso.

9-69 ¿Qué es una mazarota? ¿Por qué debe solidificarse después de la pieza colada?

9-70 Calcule el volumen, el diámetro y la altura de la mazarota cilíndrica que se requiere para evitar la contracción en una pieza colada de 25.4 mm × 152.4 mm × 152.4 mm si la H/D de la mazarota es de 1.0.

9-71 Calcule el volumen, el diámetro y la altura de la mazarota cilíndrica que se requiere para prevenir la contracción de una pieza colada de 101.6 mm × 254 mm × 508 mm si la H/D de la mazarota es de 1.5.

9-72 La figura 9-29 muestra una mazarota cilíndrica unida a una pieza colada. Compare los tiempos

de solidificación de cada sección de la pieza colada y la mazarota y determine si esta será eficaz.

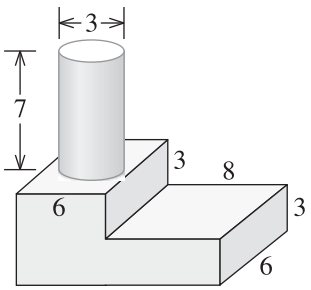


Figura 9-29 Pieza colada de bloque en escalón (problema 9-72).

9-73 La figura 9-30 muestra una mazarota cilíndrica unida a una pieza colada. Compare los tiempos de solidificación de cada sección de la pieza colada y la mazarota y determine si la mazarota será eficaz.

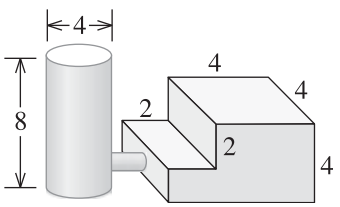


Figura 9-30 Pieza colada de bloque en escalón (problema 9-73).

9-74 Un molde cilíndrico hueco para el vaciado de lingotes de aluminio tiene 300 mm de diámetro interior y 2 m de altura. Si se llena el molde con aluminio líquido a 935 K, ¿cuál es la mayor cavidad esférica que puede formarse en el lingote?

9-75 Se permite que una esfera de cobre líquido de 101.6 mmn de diámetro se solidifique, lo que produce una cavidad esférica por contracción en el centro de la pieza colada. Compare el volumen y el diámetro de la cavidad por contracción en la pieza colada de cobre con el que se obtiene cuando se permite que se solidifique una esfera de hierro líquido de 101.6 mm.

9-76 Se permite que un cubo de un metal líquido de 101.6 mm se solidifique. En la pieza colada sólida se observa una cavidad esférica por contracción con un diámetro de 37.85 mm. Determine el porcentaje del cambio del volumen que ocurre durante la solidificación.

9-77 Se produce una pieza colada de magnesio de 20 mm × 40 mm × 60 mm. Después de enfriarse a temperatura ambiente, se encuentra que la pieza colada pesa 80 g. Determine

a) el volumen de la cavidad por contracción en el centro de la pieza colada y

b) el porcentaje de contracción que debe haber ocurrido durante la solidificación.

9-78 Se produce una pieza colada de hierro de 50.8 mm × 203.2 mm × 254 mm. Después de enfriarse a temperatura ambiente, se encuentra que pesa 19.91 kg. Determine

a) el porcentaje de contracción que debe haber ocurrido durante la solidificación y

b) el número de poros por contracción en la pieza colada si toda la contracción ocurre como poros con un diámetro de 0.05 pulg.

9-79 Si se enfría un recipiente abierto de galio líquido hasta que se forme una fina "torta" sólida, ¿esta se formará en la parte superior o inferior? Suponga que el aire por encima del líquido de galio está estancado y no se enfría la superficie en absoluto.

9-80 Proporcione ejemplos de materiales que se expanden durante la solidificación.

9-81 ¿Qué es la ley de Sievert? ¿Cómo puede eliminarse o minimizarse la porosidad gaseosa en las aleaciones fundidas?

9-82 En el contexto de la preparación del acero inoxidable, ¿qué es la descarburización con argón y oxígeno?

9-83 Se vierte magnesio líquido en un molde de 20 mm × 20 mm × 240 mm y, como resultado de la solidificación direccional, toda la contracción por solidificación ocurre a lo largo de la longitud de la pieza colada de 240 mm. Determine la longitud de la pieza colada inmediatamente después de que se completa la solidificación.

9-84 Un hierro colado líquido tiene una densidad de 7,650 kg/m^3. Inmediatamente después de la solidificación, la densidad del hierro colado sólido se determina que es de 7,710 kg/m^3. Determine el porcentaje del cambio de volumen que ocurre durante la solidificación. ¿El hierro colado se expande o se contrae durante la solidificación?

9-85 El cobre fundido a presión atmosférica contiene un porcentaje en peso de 0.01 de oxígeno. El cobre fundido se coloca en una cámara que se bombea a 1 Pa para eliminar el gas de la fundición antes de verterlo en el molde. Calcule el contenido de oxígeno del fundido de cobre después de que se lo somete al tratamiento de desgasificación.

9-86 A partir de la figura 9-14, encuentre la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido antes de que comience la solidificación cuando la pre-

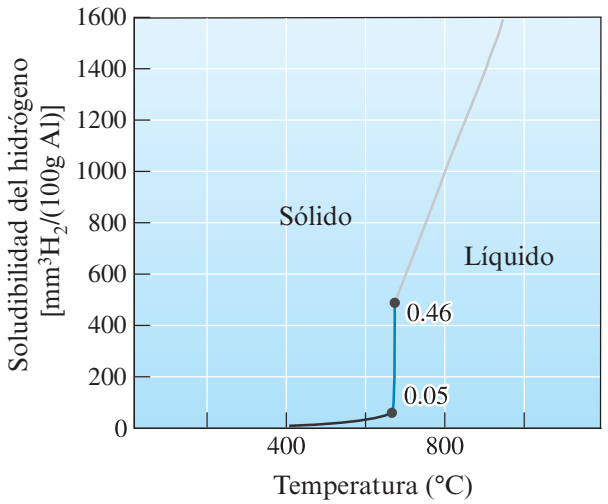


Figura 9-14 Solubilidad del gas hidrógeno en aluminio cuando la presión parcial del H_2 = 1 atm. (Repetida para el problema 9-86.)

sión parcial del hidrógeno es de 1 atm. Determine la solubilidad del hidrógeno (en cm^3/100 g de Al) a la misma temperatura si la presión parcial se redujera a 0.01 atm.

9-87 Se determina que la solubilidad del hidrógeno en aluminio líquido a 715°C es de 1 cm^3/100 g de Al. Si todo este hidrógeno se precipita como burbujas de gas durante la solidificación y permanece atrapado en la fundición, calcule el porcentaje en volumen del gas en el aluminio sólido.

9-88 Las pulgadas de mercurio son el método usual de medición de un vacío en la industria de la bomba de vacío en Estados Unidos. Por ejemplo, la presión atmosférica es de 760 mm de mercurio. Convierta la presión que se encuentra en el ejemplo 9-7 a esta unidad.

Sección 9-9 Procesos de vaciado para fabricar componentes

9-89 Explique el proceso de moldeo en arena verde.

9-90 ¿Por qué las piezas coladas hechas a partir de colado en matriz a presión son probablemente más resistentes que las que se hacen utilizando el proceso de vaciado en arena?

9-91 Una aleación se vacía en una forma utilizando un molde de arena y un molde metálico. ¿Qué pieza colada se espera que sea más resistente y por qué?

9-92 ¿Qué es vaciado por revestimiento? ¿Cuáles son las ventajas de este procedimiento? Explique por qué este proceso se utiliza con frecuencia para colar álabes de turbinas.

9-93 ¿Por qué la presión es un componente clave del proceso de colado en matriz a presión?

Sección 9-10 Colada continua y vaciado de lingotes

9-94 ¿Qué es un mineral?

9-95 Explique de manera breve cómo se fabrica el acero, comenzando con el mineral de hierro, el coque y la piedra caliza.

9-96 Explique cómo se utiliza la chatarra para preparar aleaciones.

9-97 ¿Qué es un lingote?

9-98 ¿Por qué ha asumido cada vez más importancia la colada continua de aceros y otras aleaciones?

9-99 ¿Cuáles son algunas de las etapas que siguen al proceso de colada continua?

Sección 9-11 Solidificación direccional (SD), crecimiento de monocristales y crecimiento epitaxial

9-100 Defina el término solidificación direccional.

9-101 Explique la función de la formación de núcleos y crecimiento en el crecimiento de monocristales.

Sección 9-12 Solidificación de polímeros y vidrios inorgánicos

9-102 ¿Por qué la mayoría de los plásticos contiene regiones amorfas y cristalinas?

9-103 ¿Qué es una esferulita?

9-104 ¿De qué forma el procesamiento puede influir en la cristalinidad de los polímeros?

9-105 Explique por qué los vidrios de silicato tienden a formar vidrios amorfos; sin embargo, las fundiciones metálicas por lo general se cristalizan con facilidad.

Sección 9-13 Unión de materiales metálicos

9-106 Defina los términos soldadura fuerte y soldadura blanda.

9-107 ¿Cuál es la diferencia entre soldadura por fusión, soldadura fuerte y soldadura blanda?

9-108 ¿Qué es una zona afectada por el calor?

9-109 Explique por qué, cuando se utilizan fuentes de calor de baja intensidad, la resistencia del material en una región soldada puede reducirse.

9-110 ¿Por qué los procesos de soldadura con láser y haz de electrones producen soldaduras más resistentes?

Problemas de diseño

9-111 El aluminio se funde en condiciones que dan 6×10^{-8} m^3 de H_2 por 100 g de aluminio. Se ha descubierto que se debe tener no más de 2×10^{-9} m^3 de H_2 por 100 g de aluminio para prevenir la formación de burbujas de gas hidrógeno durante la solidificación. Diseñe un proceso de tratamiento para el aluminio líquido

que asegure que no se forme la porosidad por hidrógeno.

9-112 Cuando se unen dos placas de cobre de 12.7 mm de grosor empleando un proceso de soldadura con arco, la zona de fusión contiene dendritas que tienen un EBDS de 0.06 mm; sin embargo, este proceso produce esfuerzos residuales grandes en la soldadura. Se ha comprobado que los esfuerzos residuales son bajos cuando las condiciones de soldadura producen un EBDS de más de 0.2 mm. Diseñe un proceso por medio del cual se puedan lograr esfuerzos residuales bajos. Justifique su diseño.

9-113 Diseñe un sistema eficiente de mazarota para la pieza que se muestra en la figura 9-31. Asegúrese de incluir una representación del sistema, junto con las dimensiones apropiadas.

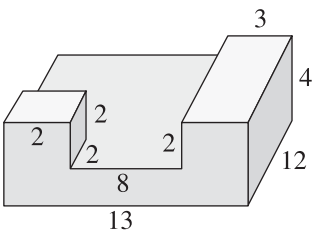


Figura 9-31 Mazarota para vaciado (problema 9-113).

9-114 Diseñe un proceso que produzca una pieza colada de acero que tenga propiedades uniformes y una resistencia alta. Asegúrese de incluir las características de la microestructura que desee controlar y explique cómo lo haría.

9-115 Se va a inyectar aluminio fundido en un molde de acero bajo presión (fundición en molde). La pieza es, en esencia, un cilindro de 305 mm de largo y de 50.8 mm de diámetro con un grosor de pared uniforme y debe tener una resistencia a la tensión mínima de 276 MPa. Con base en las propiedades dadas en la figura 9-7, diseñe la pieza y el proceso.

Problemas por computadora

9-116 *Radio crítico de la nucleación homogénea.* Edite un programa de cómputo que permita calcular el radio crítico de la formación de núcleos (r^*). El programa debe pedirle al usuario que proporcione los valores de σ_{sl}, T_f, subenfriamiento (ΔT) y la entalpía de fusión (ΔH_f). Por favor, asegúrese de que las peticiones del programa sean correctas para tener los valores de entrada en las unidades correctas.

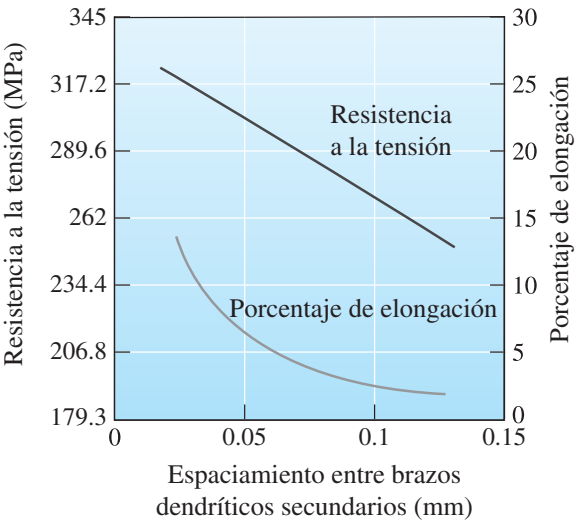


Figura 9-7 Efecto del espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación fundida de aluminio. (Repetida para el problema 9-115.)

9-117 *Energía libre para formar un núcleo de tamaño crítico por medio de la nucleación heterogénea.* Cuando la formación de núcleos ocurre de manera heterogénea, la energía libre de un núcleo de un tamaño crítico ($\Delta G^{*\text{hetero}}$) está dada por

$$\Delta G^{*\text{hetero}} = \Delta G^{*\text{homo}} f(\theta), \text{ donde}$$

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2}{4}$$

y $\Delta G^{*\text{homo}}$ está dada por $\dfrac{16\pi\sigma_{sl}^3}{3\Delta G_v^2}$,

la cual es la energía libre de la nucleación homogénea de un núcleo de tamaño crítico. Si el ángulo de contacto (θ) de la fase que se está nucleando en la superficie preexistente es de 180°, no hay humectación y el valor de la función $f(\theta)$ es 1. La energía libre de la formación de un núcleo de un radio crítico es la misma que la de la nucleación homogénea. Si la fase de formación de núcleos humedece al sólido por completo (es decir, $\theta = 0$), entonces $f(\theta) = 0$ y no hay barrera para la nucleación. Edite un programa de cómputo que le pida al usuario que proporcione los valores de los parámetros necesarios a fin de calcular la energía libre para la formación de un núcleo por medio de la nucleación homogénea. El programa debe calcular el valor de $\Delta G^{*\text{hetero}}$ como una función del ángulo de contacto (θ) de 0 a 180°. Examine la variación de los valores de la energía libre como una función del ángulo de contacto.

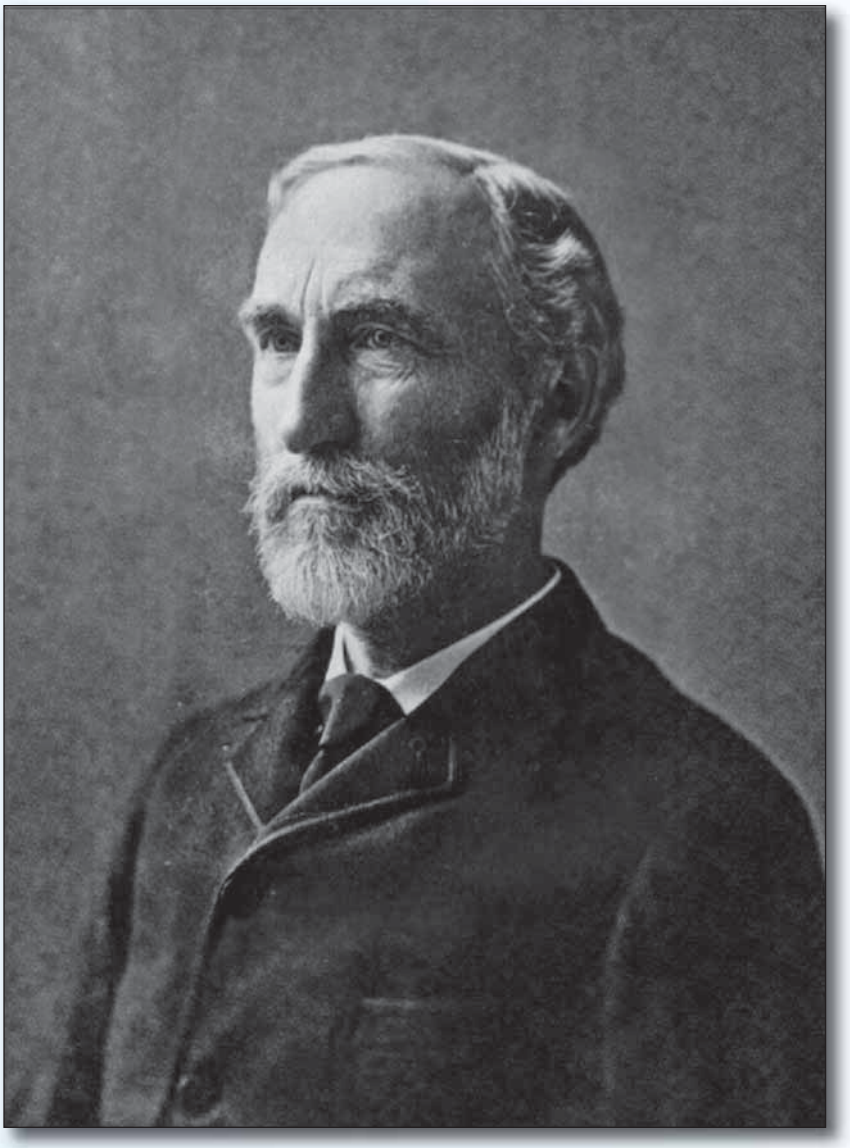
9-118 *Regla de Chvorinov.* Edite un programa de cómputo que calcule el tiempo de solidificación

de una pieza colada. El programa debe pedirle al usuario que introduzca el volumen de la pieza colada y el área de superficie a partir de la cual ocurrirá la transferencia de calor y la constante del molde. El programa debe utilizar la regla de Chvorinov para calcular el tiempo de solidificación.

Problemas Knovel[MR]

K9-1 ¿Qué es el hierro blanco enfriado y para qué se usa?

K9-2 ¿Qué tipos de defectos pueden existir en el hierro blanco enfriado?



Josiah Willard Gibbs (1839-1903) fue un brillante físico y matemático estadounidense que condujo algunos de los trabajos pioneros más importantes relacionados con el equilibrio termodinámico. (*Portada de* The Scientific Papers of J. Willard Gibbs, *en dos volúmenes, H. A. Bumstead and R. G. Van Name eds., (London and New York: Longmans, Green, and Co., 1906*)

CAPÍTULO 10

Soluciones sólidas y equilibrio de fases

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Si es posible que coexistan las formas sólida, líquida y gaseosa de un material?*
- *¿Qué material se usa para fabricar los diodos emisores de luz roja que se usan en muchas pantallas de productos modernos?*
- *¿Cuál elemento se solidifica primero cuando lo hace una aleación como el latón: el cobre o el zinc?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Establecer y aplicar la regla de las fases de Gibbs.
- Establecer las condiciones bajo las cuales se forman las soluciones sólidas.
- Explicar los efectos de la formación de soluciones sólidas sobre las propiedades mecánicas de los materiales metálicos.
- Dibujar un diagrama de fases isomorfo que indique la temperatura de fusión de cada elemento puro y las fases presentes en cada región.
- Calcular las cantidades y composiciones de cada fase presente en cualquier punto de un diagrama de fases isomorfo.

Se ha comprobado que la resistencia de los materiales metálicos puede mejorarse si se utiliza

a) el endurecimiento por tamaño de los granos (ecuación de Hall-Petch);
b) el trabajo en frío o endurecimiento por deformación;
c) la formación de partículas pequeñas de segundas fases, y
d) las adiciones de cantidades pequeñas de elementos.

Cuando se agregan cantidades pequeñas de elementos puede formarse un material sólido conocido como solución sólida. Una **solución sólida** contiene dos o más tipos de átomos o iones que se dispersan de manera uniforme a lo largo del material. La impureza o los átomos del **soluto** pueden ocupar los sitios de redes generales en el cristal o los sitios intersticiales. Cuando se controla la cantidad de estos defectos de punto (puntuales) por medio de la composición, se pueden manipular ciertas propiedades, entre ellas las mecánicas,

de las soluciones sólidas. Por ejemplo, en los materiales metálicos, los defectos de punto creados por impurezas o átomos de soluto perturban el arreglo atómico del material cristalino e interfieren con el movimiento de las dislocaciones. Los defectos de punto provocan que el material se endurezca por solución sólida.

La introducción de elementos de aleación o impurezas durante el procesamiento modifica la composición del material e influye en su comportamiento de solidificación. En este capítulo se examinará este efecto a través de la introducción del concepto del diagrama de equilibrio de fases. Por ahora, se considera una "fase" como una forma única en la que existe un material. Más adelante en este capítulo se definirá de manera más precisa el término "fase". Un diagrama de fases indica la estabilidad de las distintas fases de un conjunto de elementos (por ejemplo, Al y Si). A partir del diagrama de fases, se puede predecir cómo se solidificará un material en condiciones de equilibrio. También se puede anticipar cuáles fases se puede esperar que sean termodinámicamente estables y en qué concentraciones deben estar presentes.

10-1 Fases y diagrama de fases

Los elementos metálicos puros tienen aplicaciones en ingeniería; por ejemplo, el cobre o el aluminio de pureza ultraalta se usan para fabricar circuitería microelectrónica. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones se emplean **aleaciones**. Una "aleación" se define como un material que tiene propiedades de un material metálico y está conformado por múltiples elementos. Un *acero al carbono simple* es una aleación de hierro y carbono. Los **aceros inoxidables** resistentes a la corrosión son aleaciones que por lo general contienen hierro, carbono, cromo, níquel y algunos otros elementos. Existen dos tipos de aleaciones: **aleaciones de una fase** y **aleaciones multifase**. En este capítulo se estudiará el comportamiento de las aleaciones de una fase. Como primera etapa, se define "fase" y se determina cómo la regla de las fases ayuda a determinar el estado —sólido, líquido o gaseoso— en el que existe un material puro.

Una **fase** puede definirse como cualquier parte, lo cual incluye el total, de un sistema físicamente homogéneo dentro de sí mismo y delimitado por una superficie que lo separa de cualquier otra parte. Por ejemplo, el agua tiene tres fases —agua líquida, hielo sólido y vapor—. Una fase tiene las siguientes características:

1. la misma estructura o arreglo atómico a lo largo de ella;
2. casi la misma composición y propiedades a lo largo de ella, y
3. una interfase definida entre la fase y cualquier fase circundante o adjunta.

Por ejemplo, si se encierra un bloque de hielo en una cámara de vacío [figura 10-1*a*)], el hielo comienza a derretirse y parte del agua se vaporiza. En estas condiciones coexisten tres fases: H_2O sólida, H_2O líquida y H_2O gaseosa. Cada una de estas formas del H_2O es una fase distinta; cada una tiene un arreglo atómico único, propiedades únicas y un límite definido entre cada forma. En este caso, las fases tienen composiciones idénticas.

Regla de las fases

Josiah Willard Gibbs (1839-1903) fue un brillante físico y matemático estadounidense que llevó a cabo algunos de los trabajos pioneros más importantes relacionados con el equilibrio termodinámico.

En 1875-1876 Gibbs desarrolló la **regla de las fases**. Mediante ella describe la relación entre el número de componentes y el número de fases de un sistema determinado y las condiciones que pueden permitirse que varíen (por ejemplo, la temperatura, la presión, etc.). La regla tiene la forma general:

$$2 + C = F + P \text{ (cuando la temperatura y la presión pueden variar)} \qquad (10\text{-}1)$$

Una regla nemónica útil (algo que le permitirá recordar) de la regla de las fases de Gibbs es comenzar con un numérico y continuar con el resto de los términos de manera alfabética (es decir, C, F y P) empleando todos los signos positivos. En la regla de fases, C es el número de componentes

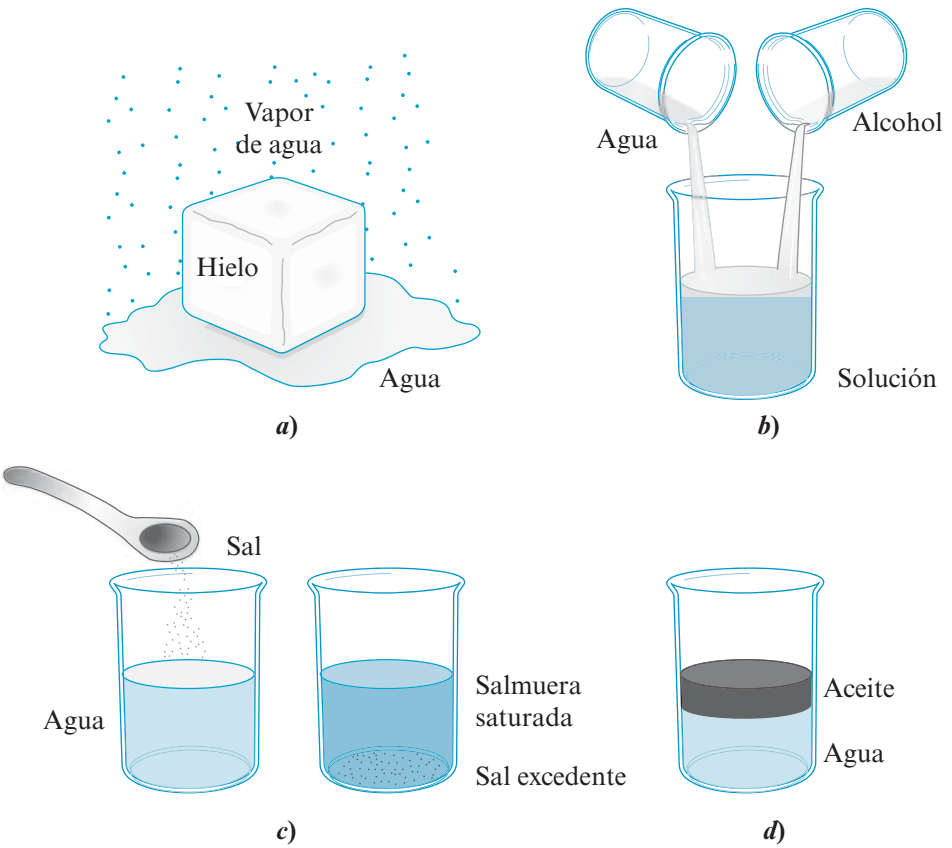


Figura 10-1 Ilustración de las fases y la solubilidad: *a*) Las tres formas del agua —gaseosa, líquida y sólida— son cada una de ellas una fase. *b*) El agua y el alcohol tienen solubilidad ilimitada. *c*) La sal y el agua tienen solubilidad limitada. *d*) Prácticamente, el agua y el aceite no son solubles entre ellos.

químicamente independientes del sistema, por lo general los elementos o compuestos; F es el número de grados de libertad o el número de variables (como temperatura, presión o composición), que se permite que varíen de manera independiente sin modificar el número de fases en equilibrio, y P es el número de fases presentes (por favor, no confunda P con "presión"). La constante "2" en la ecuación 10-1 implica que se permite que varíen la temperatura y la presión. El término "químicamente independiente" señala el número de elementos o compuestos diferentes necesarios para especificar un sistema. Por ejemplo, el agua (H_2O) se considera como un sistema de un componente, dado que las concentraciones de H y O en H_2O no pueden modificarse de manera independiente.

Es importante observar que la regla de las fases de Gibbs supone un equilibrio termodinámico y, por lo general en el procesamiento de materiales, se encuentran condiciones en las que *no* se mantiene el equilibrio. Por lo tanto, no sorprende ver que la cantidad y composiciones de las fases observadas en la práctica sean evidentemente distintas de las pronosticadas por la regla de fases de Gibbs.

Otro punto que se debe observar es que las fases no siempre tienen que ser las formas sólida, líquida y gaseosa de un material. Un elemento, como el hierro, puede existir en estructuras cristalinas CCCa y CCCu. Estas dos formas sólidas del hierro son dos fases distintas del hierro que serán estables a temperaturas y en condiciones de presión distintas. De manera similar, el hielo, por sí mismo, puede existir en varias estructuras cristalinas, lo mismo que el carbono (por ejemplo, grafito o diamante). Estas sólo son dos de las varias fases posibles del carbono, como se vio en el capítulo 2.

Como ejemplo del uso de la regla de las fases, considere el caso del magnesio puro. La figura 10-2 muestra un **diagrama de fases de una sustancia pura** ($C = 1$) en el que las líneas dividen las

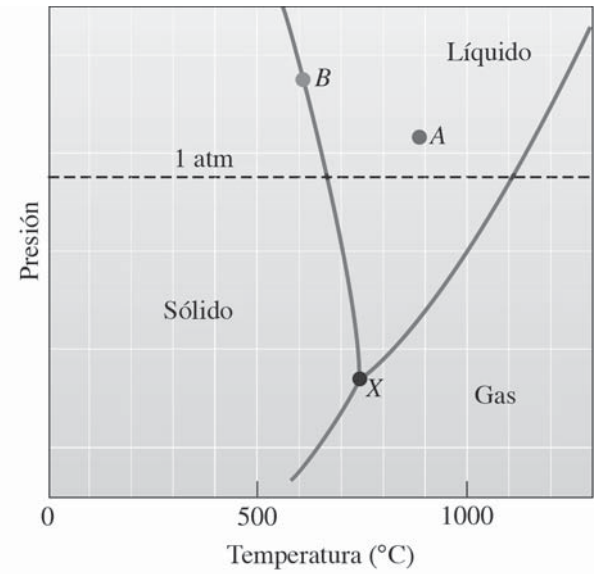


Figura 10-2 Diagrama de fases de una sustancia pura del magnesio, que muestra las temperaturas de fusión y ebullición a una atmósfera de presión. En este diagrama, el punto *X* es el punto triple.

fases líquida, sólida y gaseosa. A este diagrama de fases de una sustancia pura también se le llama **diagrama P-T** o de presión-temperatura. En el diagrama de fases de una sustancia pura, sólo hay un componente; en este caso, magnesio. Sin embargo, según la temperatura y la presión pueden existir una, dos, o incluso tres *fases* presentes en cualquier tiempo: magnesio sólido, magnesio líquido y vapor de magnesio. Observe que a presión atmosférica (una atmósfera, dada por la línea discontinua), la intersección de las líneas en el diagrama de fases proporciona las temperaturas de fusión y ebullición comunes del magnesio. A presiones muy bajas, un sólido como este elemento puede *sublimarse*, o pasar de manera directa a una forma de vapor sin fundirse, cuando se calienta.

Suponga que se tiene una combinación de presión y temperatura que definen el punto *A* en el diagrama de fases (figura 10-2). En este punto, el magnesio es totalmente líquido. El número de fases es uno (líquida). La regla de las fases indica que hay dos grados de libertad. A partir de la ecuación 10-1:

$$2 + C = F + P, \text{ por lo tanto, } 2 + 1 = F + 1 \text{ (es decir, } F = 2)$$

¿Qué significa esto? Dentro de los límites, como se observa en la figura 10-2, se puede modificar la presión, la temperatura o ambas, y aun permanecer en la parte totalmente líquida del diagrama. Puesto de otra manera, se deben fijar la temperatura y la presión para conocer con precisión en dónde se está en la parte líquida del diagrama.

Considere el punto *B*, el límite entre las porciones sólida y líquida del diagrama. El número de componentes, *C*, sigue siendo uno, pero en el punto *B*, coexisten el sólido y el líquido, o el número de fases *P* es dos. A partir de la regla de las fases (ecuación 10-1):

$$2 + C = F + P, \text{ por lo tanto, } 2 + 1 = F + 2 \text{ (es decir, } F = 1)$$

o sólo hay un grado de libertad. Por ejemplo, si se modifica la temperatura, la presión también debe ajustarse para permanecer en el límite donde el líquido y el sólido coexisten. Por otro lado, si se fija la presión, el diagrama de fases indica la temperatura que debe privar para que coexistan el sólido y el líquido.

Por último, en el punto *X*, coexisten el sólido, el líquido y el vapor. Mientras el número de componentes siga siendo uno, hay tres fases. El número de grados de libertad es cero:

$$2 + C = F + P, \text{ por lo tanto, } 2 + 1 = F + 3 \text{ (es decir, } F = 0)$$

Ahora no se tienen grados de libertad; las tres fases coexisten sólo si se fijan la temperatura y la presión. Un punto en el diagrama de fases en el que coexisten las fases sólida, líquida y gaseosa en condiciones de equilibrio es el **punto triple** (figura 10-2).

Ejemplo 10-1 *Diseño de un componente aeroespacial*

Dado que el magnesio es un material de baja densidad ($\rho_{Mg} = 1.738$ g/cm^3), se ha sugerido que se lo utilice para fabricar un vehículo aeroespacial diseñado con la intención de que circule en el espacio exterior. ¿Es este un buen diseño?

SOLUCIÓN

En el espacio la presión es muy baja. Incluso a temperaturas relativamente bajas, el magnesio sólido comienza a transformarse en vapor, lo que provoca pérdida del metal que podría dañar un vehículo espacial. Además, la radiación solar podría ocasionar que el vehículo se caliente, lo cual incrementaría la velocidad de pérdida de magnesio.

Un material de baja densidad con un punto de ebullición mayor (y, por lo tanto, menor presión de vapor a cualquier temperatura) podría ser una mejor elección. A presión atmosférica, el aluminio hierve a 2494°C, mientras que el berilio lo hace a 2770°C, en comparación con la temperatura de ebullición de 1107°C del magnesio. Aunque el aluminio y el berilio son un poco más densos que el magnesio, cualquiera podría ser una mejor elección. Dados los efectos tóxicos del Be y de muchos de sus compuestos cuando están pulverizados, puede ser preferible considerar al aluminio primero.

Existen otros factores que se deben considerar. En las aplicaciones de soporte de carga, no sólo se busca densidad sino también resistencia relativa. Por lo tanto, la razón del módulo de Young a la densidad o la resistencia a la fluencia a la densidad podría ser un mejor parámetro para comparar los distintos materiales. Cuando se realiza esta comparación se tiene que ser consciente de que la resistencia a la fluencia, por ejemplo, depende en gran medida de la microestructura y que la resistencia del aluminio puede incrementarse si se utilizan aleaciones en las cuales intervenga este elemento, mientras que la densidad se mantiene casi igual. También deben considerarse otros factores como la oxidación durante la reentrada a la atmósfera de la Tierra.

10-2 Solubilidad y soluciones sólidas

Con frecuencia es útil conocer cuánto de cada material o componente se puede combinar sin que se produzca una fase adicional. Cuando se comienza a combinar distintos componentes o materiales, a medida que se adicionan elementos de aleación a un metal, pueden formarse soluciones sólidas o líquidas. Por ejemplo, cuando se agrega azúcar al agua, se forma una solución de azúcar. En otras palabras, el interés radica en la **solubilidad** de un material en otro (por ejemplo, azúcar en agua, cobre en níquel, fósforo en silicio, etcétera).

Solubilidad ilimitada

Suponga que se comienza con un vaso de agua y un vaso de alcohol. El agua es una fase y el alcohol es una segunda fase. Si se vierte el agua en el alcohol y se agita, sólo se produce una fase [figura 10-1*b*)]. El vaso contiene una solución de agua y alcohol que tiene propiedades y composición únicas. El agua y el alcohol son solubles entre sí. Además, muestran **solubilidad ilimitada**. Independientemente de la razón de agua y alcohol, sólo se produce una fase cuando se mezclan entre sí.

De manera similar, si se mezclaran cantidades cualesquiera de cobre líquido y níquel líquido, sólo se produciría una fase líquida. Esta aleación líquida tiene la misma composición y propiedades en cualquier parte [figura 10-3*a*)] debido a que el níquel y el cobre tienen solubilidad líquida ilimitada.

Si se solidifica y enfría la aleación líquida de cobre-níquel a temperatura ambiente, mientras se mantiene el equilibrio térmico, sólo se produce una fase sólida. Después de la solidificación, los átomos de cobre y níquel no se separan sino que se ubican de manera aleatoria dentro de la estructura cristalina CCCa. En la fase sólida, la estructura, las propiedades y la composición son uniformes y no existe una interfase entre los átomos de cobre y níquel. Por lo tanto, el cobre y el níquel también tienen solubilidad sólida ilimitada. La fase sólida es una solución sólida de cobre y níquel [figura 10-3*b*)].

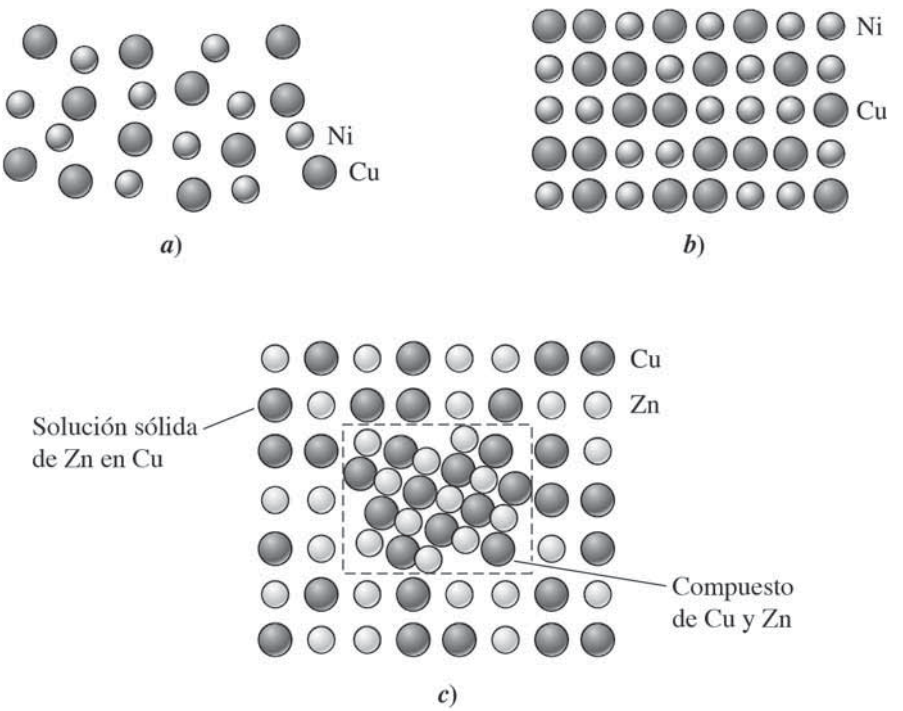


Figura 10-3 *a*) El cobre y el níquel líquidos son completamente solubles entre sí. *b*) Las aleaciones sólidas de cobre-níquel muestran una solubilidad sólida completa, en la cual los átomos de cobre y níquel ocupan sitios de red aleatorios. *c*) En las aleaciones de cobre-zinc que contienen más de 30% de Zn, se forma una segunda fase debido a la solubilidad limitada del zinc en cobre.

Una solución sólida *no* es una mezcla. Una mezcla contiene más de un tipo de fase y las características de cada una de éstas se conservan cuando se forma la mezcla. En contraste con este proceso, los componentes de una solución sólida se disuelven por completo entre sí y no mantienen sus características individuales.

Otro ejemplo de un sistema que forma una solución sólida es el del titanato de bario ($BaTiO_3$) y el titanato de estroncio ($SrTiO_3$), los cuales son compuestos que se encuentran en el sistema ternario BaO-TiO_2-SrO. Se utilizan soluciones sólidas de $BaTiO_3$ y $SrTiO_3$ y otros óxidos para fabricar componentes electrónicos como capacitores. Cada año se fabrican millones de capacitores multicapa empleando tales materiales (capítulo 19).

Numerosos semiconductores compuestos que comparten la misma estructura cristalina forman con facilidad soluciones sólidas con solubilidad total. Por ejemplo, se pueden formar soluciones sólidas de arseniuro de galio (GaAs) y arseniuro de aluminio (AlAs). Los LED rojos que más se usan en las pantallas se fabrican con soluciones sólidas basadas en el sistema GaAs-GaP. Las soluciones sólidas pueden formarse con más de dos compuestos o elementos.

Solubilidad limitada

Cuando se adiciona una cantidad pequeña de sal (una fase) a un vaso de agua (una segunda fase) y se agita, la sal se disuelve por completo en el agua. Sólo se encuentra una fase (agua salada o salmuera). Sin embargo, si se agrega demasiada sal al agua, la sal en exceso se hunde hasta la parte inferior del vaso [figura 10-1*c*)]. Ahora se tienen dos fases, el agua que está saturada con sal más la sal sólida en exceso. Por ello se puede decir que la sal tiene una solubilidad limitada en el agua. Si se agrega una cantidad pequeña de zinc líquido al cobre líquido, se produce una sola solución líquida. Cuando la solución de cobre-zinc se enfría y solidifica, resulta una sola solución sólida que tiene una estructura CCCa, con los átomos de cobre y zinc localizados de manera aleatoria en los puntos de red normales. Si la solución líquida contiene más de alrededor de 30 % de Zn, una parte de los átomos del zinc en exceso se combinan con una parte de los átomos de cobre para formar un compuesto de CuZn [figura 10-3*c*)]. Ahora coexisten dos fases sólidas: una

solución sólida de cobre saturado con alrededor de 30% de Zn más un compuesto de CuZn. La solubilidad del zinc en cobre es limitada. La figura 10-4 muestra una parte del diagrama de fases del Cu-Zn que ilustra la solubilidad del zinc en cobre a temperaturas bajas. La solubilidad aumenta con el incremento de la temperatura. Este fenómeno es similar al que se produce cuando, mediante el incremento de la temperatura, se puede disolver más azúcar o sal en agua. Las soluciones sólidas pueden formar mecanismos sustitucionales o intersticiales. Los átomos o iones huéspedes pueden entrar en la estructura cristalina anfitriona en las posiciones cristalográficas o en los intersticios generales.

En el capítulo 5 se estudió la forma en que el silicio puede doparse con fósforo, boro o arsénico. Todos estos elementos dopantes tienen solubilidad limitada en Si (es decir, a concentraciones pequeñas forman una solución sólida con el Si). En realidad, para que estos dopantes alteren efectivamente la conductividad del Si, deben formar soluciones sólidas sustitucionales con él, como analizaremos en el capítulo 19. Observe que se producen soluciones sólidas incluso si hay solubilidad limitada. No se necesita una solubilidad sólida para cada composición posible de soluciones sólidas para formarse dentro de los rangos limitados de composición (capítulo 11).

En el caso extremo, puede no haber casi solubilidad de un material en otro. Esto es verdadero en el caso del aceite y el agua [figura 10-1*d*)] o de las aleaciones de cobre-plomo (Cu-Pb). Observe que, aun cuando los materiales no se disuelven entre sí, pueden dispersarse uno en el otro. Por ejemplo, pueden mezclarse fases parecidas al aceite y líquidos acuosos, con frecuencia mediante la ayuda de surfactantes (moléculas parecidas al jabón), para formar emulsiones. La inmiscibilidad, o falta se solubilidad, se observa en muchos materiales cerámicos y metálicos fundidos y sólidos.

Sistemas poliméricos Se pueden procesar materiales poliméricos para mejorar sus características empleando un concepto similar al que se aplica para formar soluciones sólidas en sistemas metálicos y cerámicos. De esta manera es posible formar materiales conocidos como **copolímeros,** que consisten en distintos monómeros. Por ejemplo, los monómeros acrilonitrilo (A), butadieno (B) y estireno (S) pueden hacerse reaccionar para formar un copolímero conocido como ABS, similar a una solución sólida que posee las funcionalidades de los tres monómeros de los cuales se deriva, mezclando sus propiedades. De manera similar a las soluciones sólidas de Cu-Ni o de $BaTiO_3$-$SrTiO_3$, no es posible separar el acrilonitrilo, el butadieno o el estireno de un plástico ABS.

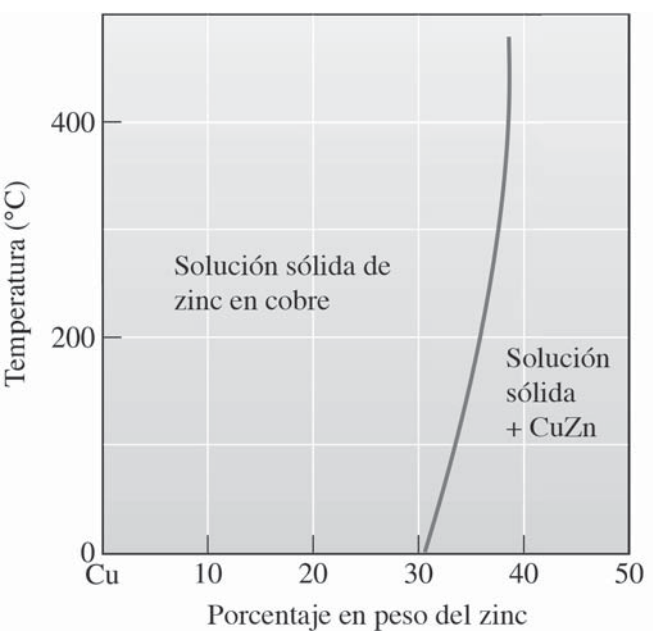


Figura 10-4 Solubilidad del zinc en cobre. La línea sólida representa el límite de solubilidad; cuando se adiciona zinc en exceso, se traspone el límite de solubilidad y coexisten dos fases.

Se emplea el moldeo por inyección para convertir el ABS en teléfonos, cascos, volantes de automóviles y estuches de aparatos pequeños. El Dylark[MR] es otro ejemplo de un copolímero cuyos componentes son el anhídrido maleico y un monómero de estireno. El copolímero Dylark[MR], con negro de carbón para protección UV, reforzado con fibra de vidrio y endurecido con caucho, se usa para fabricar los paneles de instrumentos de muchos automóviles (capítulo 16).

10-3 Condiciones de la solubilidad sólida ilimitada

Para que un sistema de aleación, como el cobre-níquel tenga solubilidad sólida ilimitada, deben satisfacerse ciertas condiciones, las cuales, conocidas como **reglas de Hume-Rothery**, son las siguientes:

1. *Factor tamaño*: Los átomos o iones deben ser de tamaño similar, con no más de 15 % de diferencia entre sus radios atómicos, para minimizar la deformación de red (es decir, minimizar, a un nivel atómico, las desviaciones ocasionadas en el espaciado interatómico).
2. *Estructura cristalina*: Los materiales deben poseer la misma estructura cristalina; de lo contrario, existe un punto en el que ocurre una transición de una fase a una segunda fase con una estructura diferente.
3. *Valencia*: Los iones deben tener la misma valencia; en caso contrario, la diferencia entre los electrones de valencia promueve la formación de compuestos en vez de soluciones.
4. *Electronegatividad*: Los átomos deben tener aproximadamente la misma electronegatividad, esto es, similar afinidad con los electrones (capítulo 2). Si las electronegatividades difieren de forma significativa, se forman compuestos, como cuando los iones sodio y cloruro se combinan para formar cloruro de sodio.

Las condiciones de Hume-Rothery deben satisfacerse, pero no son necesariamente suficientes, para que dos metales o compuestos tengan solubilidad sólida ilimitada.

La figura 10-5 muestra de manera esquemática las estructuras bidimensionales del MgO y del NiO. Los iones Mg^{2+} y Ni^{2+} son similares en tamaño y valencia y, en consecuencia, pueden reemplazarse entre sí en una estructura cristalina de cloruro de sodio (NaCl) (capítulo 3), para formar una serie completa de soluciones sólidas de la forma $(Mg_x^{+2}Ni_{1-x}^{+2})O$, donde x = la fracción molar de Mg^{2+} o MgO.

La solubilidad de los átomos intersticiales siempre es limitada. Éstos son mucho más pequeños que los átomos del elemento anfitrión, por lo que no cumplen la primera de las condiciones de Hume-Rothery.

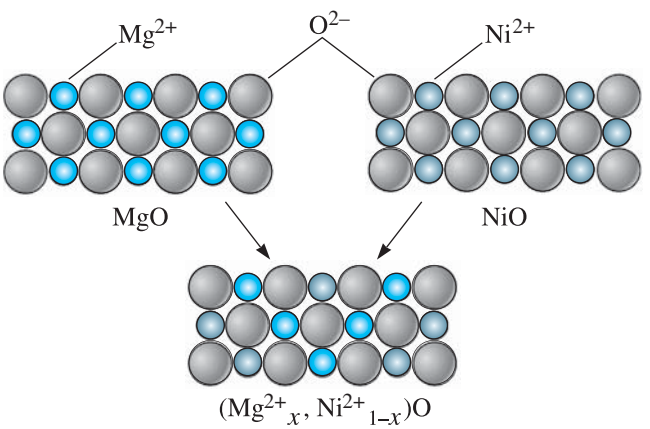


Figura 10-5 El MgO y el NiO tienen estructuras cristalinas, radios iónicos y valencias similares; por lo tanto, los dos materiales cerámicos pueden formar soluciones sólidas.

Ejemplo 10-2 *Soluciones cerámicas sólidas de MgO*

Puede agregarse NiO al MgO para producir una solución sólida. ¿Qué otros sistemas cerámicos es probable que tengan una solubilidad sólida total con el MgO?

SOLUCIÓN

En este caso, se deben considerar aditivos óxidos que posean cationes metálicos con la misma valencia y radio iónico que el de los cationes de magnesio. La valencia del ion magnesio es +2 y su radio iónico es 0.66 Å. Según el apéndice B, algunas otras posibilidades en las que el catión tiene una valencia +2 incluyen las siguientes:

	r (Å)	$\left[\frac{r_{ion} - r_{Mg^{2+}}}{r_{Mg^{2+}}}\right] \times 100\,\%$	Estructura cristalina
Cd^{2+} en CdO	$r_{Cd^{2+}} = 0.97$	47	NaCl
Ca^{2+} en CaO	$r_{Ca^{2+}} = 0.99$	50	NaCl
Co^{2+} en CoO	$r_{Co^{2+}} = 0.72$	9	NaCl
Fe^{2+} en FeO	$r_{Fe^{2+}} = 0.74$	12	NaCl
Sr^{2+} en SrO	$r_{St^{2+}} = 1.12$	70	NaCl
Zn^{2+} en ZnO	$r_{Zn^{2+}} = 0.74$	12	NaCl

También se muestra la diferencia porcentual entre los radios iónicos y las estructuras cristalinas y sugiere que el sistema FeO-MgO quizá mostrará solubilidad sólida ilimitada. Los sistemas CoO y ZnO también tienen razones de radios y estructuras cristalinas apropiadas.

10-4 Endurecimiento por solución sólida

En los materiales metálicos, uno de los efectos importantes de la formación de soluciones sólidas es el **endurecimiento por solución sólida** resultante (figura 10-7). Este endurecimiento, por medio de la formación de soluciones sólidas, es provocado por el incremento de la resistencia al movimiento de las dislocaciones. Esta es una de las razones importantes por las cuales el latón (aleación de Cu-Zn) es más resistente que el cobre puro. Los artículos de joyería podrían fabricarse de oro o plata puros, sin embargo, son extremadamente blandos y maleables. Los joyeros agregan cobre al oro y a la plata para que los artículos de joyería mantengan su forma.

En el sistema de cobre-níquel (Cu-Ni) se introduce de manera intencional un átomo sustitucional sólido (níquel) en la estructura cristalina original (cobre). La aleación de cobre-níquel es más resistente que el cobre puro. De manera semejante, si se añade menos de 30 % de Zn al cobre, el zinc se comporta como un átomo sustitucional que endurece la aleación de cobre-zinc, en comparación con el cobre puro.

Recuerde del capítulo 7 que la resistencia de las cerámicas se basa de manera principal en la distribución de las imperfecciones; la formación de soluciones sólidas no tiene un gran efecto sobre sus propiedades mecánicas. Este fenómeno es similar a lo que ocurre con el endurecimiento por deformación que no es un factor en el incremento de la resistencia de las cerámicas o semiconductores como el silicio (capítulo 8). Por lo tanto, la siguiente explicación, que se relaciona con las propiedades mecánicas se aplica principalmente a los materiales metálicos.

Grado de endurecimiento por solución sólida

El grado de endurecimiento por solución sólida depende de dos factores. Primero, una gran diferencia entre los tamaños atómicos del átomo original (anfitrión o solvente) y el átomo agregado (huésped o soluto) incrementa el efecto del endurecimiento. Una diferencia mayor entre los tamaños produce una disrupción mayor de la estructura cristalina inicial, y dificulta aún más el deslizamiento (figura 10-6).

Segundo, mientras mayor sea la cantidad del elemento de aleación agregado, mayor será el efecto de endurecimiento (figura 10-6). Una aleación de Cu-20 % Ni es más resistente que una alea-

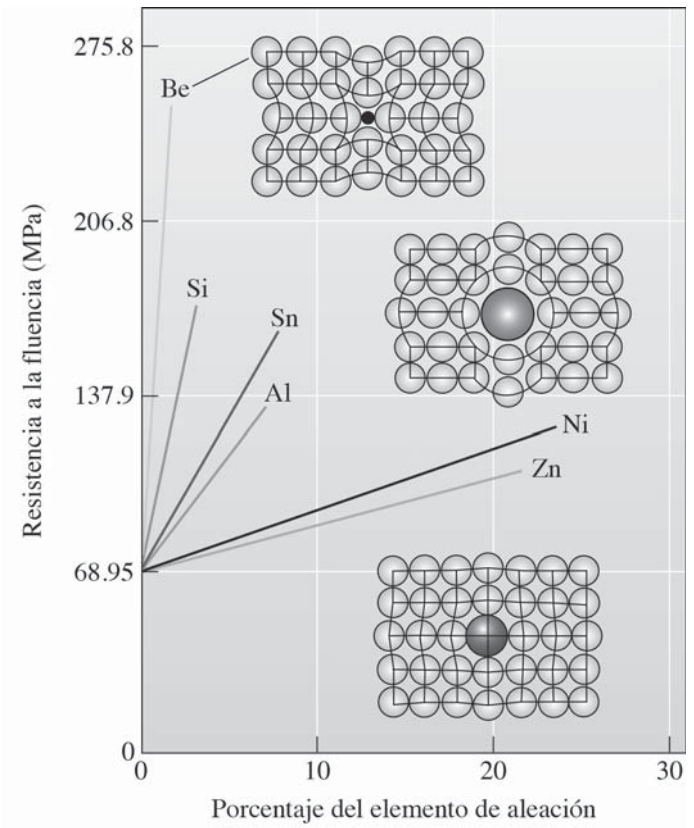


Figura 10-6 Efectos de varios elementos de aleación sobre la resistencia a la fluencia del cobre. Los átomos de níquel y zinc son casi del mismo tamaño que los átomos de cobre, pero los de berilio y estaño son muy diferentes. El incremento de la diferencia entre los tamaños atómicos y las cantidades del elemento de aleación incrementa el endurecimiento por solución sólida.

ción de Cu-10% Ni. Por supuesto, si se agrega demasiado de un átomo grande o pequeño, puede excederse el límite de solubilidad y se produce un mecanismo distinto de endurecimiento, **endurecimiento por dispersión,** en el cual la interfase entre la fase anfitriona y la fase huésped resiste el movimiento de las dislocaciones y contribuye al endurecimiento. Este mecanismo se explica más adelante en el capítulo 11.

Efecto del endurecimiento por solución sólida sobre las propiedades

Los efectos del endurecimiento por solución sólida sobre las propiedades de un metal incluyen los siguientes (figura 10-7):

1. La resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión y la dureza de la aleación son mayores que las de los metales puros. Esta es una razón por la que se usan con mayor frecuencia aleaciones en lugar de metales puros. Por ejemplo, se agregan concentraciones pequeñas de Mg al aluminio para otorgar una mayor resistencia a las aleaciones de aluminio que se usan para fabricar latas de bebidas de aluminio.
2. Casi siempre, la ductilidad de la aleación es menor que la del metal puro. Sólo en raras ocasiones, como en las aleaciones de cobre-zinc, el endurecimiento por solución sólida incrementa la resistencia y la ductilidad.
3. La conductividad eléctrica de la aleación es mucho menor que la del metal puro. Este fenómeno se debe a que los electrones son dispersados más por los átomos de los elementos de aleación que por los átomos anfitriones. No se recomienda endurecer por solución sólida los alambres de cobre o aluminio que se emplean para transmitir energía eléctrica debido a este efecto pronunciado. La conductividad eléctrica de muchas aleaciones, aunque menor que la de los metales puros, con frecuencia es más estable como función de la temperatura.
4. La resistencia a la termofluencia y la resistencia a altas temperaturas son mejoradas por el endurecimiento por solución sólida. Muchas aleaciones que deben soportar altas temperaturas, como las que se usan para partes de motores de jets, dependen parcial o ampliamente del endurecimiento por solución sólida.

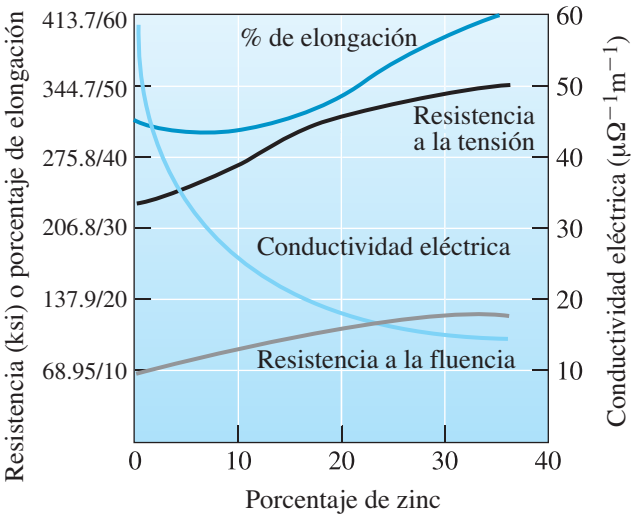


Figura 10-7 Efecto de las adiciones de zinc al cobre sobre las propiedades de la aleación endurecida por solución sólida. El incremento del porcentaje de elongación debido al incremento del contenido de zinc *no* es común del endurecimiento por solución sólida.

Ejemplo 10-3 *Endurecimiento por solución sólida*

Con base en los radios atómicos, muestre si la diferencia de tamaño entre los átomos de cobre y los átomos de aleación predicen de manera precisa el grado de endurecimiento que se encuentra en la figura 10-6.

SOLUCIÓN

Los radios atómicos y la diferencia porcentual de tamaños se muestran abajo.

Metal	Radio atómico (Å)	$\left[\frac{r_{atom} - r_{Cu}}{r_{Cu}}\right] \times 100\%$
Cu	1.278	0
Zn	1.332	+4.2
Sn	1.405	+9.9
Al	1.432	+12.1
Ni	1.243	−2.7
Si	1.176	−8.0
Be	1.143	−10.6

En el caso de átomos mayores que el cobre, es decir, zinc, aluminio y estaño, el incremento de la diferencia entre tamaños incrementa el efecto de endurecimiento. De manera similar a lo que sucede con los átomos más pequeños, el incremento de la diferencia de tamaño incrementa el endurecimiento.

10-5 Diagramas de fases isomorfos

Un **diagrama de fases** muestra las fases y sus composiciones a cualquier combinación de temperatura y composición de la aleación. Cuando sólo se presentan dos elementos o dos compuestos en un material, se puede trazar un **diagrama de fases binario**. Los **diagramas de fases isomorfos** se encuentran en varios sistemas metálicos y cerámicos. En los sistemas isomorfos, los cuales incluyen los sistemas de cobre-níquel y de NiO-MgO [figura 10-8*a*) y *b*)], sólo se forma una fase sólida; los dos componentes del sistema muestran solubilidad sólida completa. Como se muestra en los diagramas de fases de los sistemas de $CaO \cdot SiO_2 \cdot SrO$ y de talio-plomo (Tl-Pb), es posible tener diagramas de fases que muestren un punto mínimo o máximo, respectivamente [figura 10-8*c*) y *d*)].

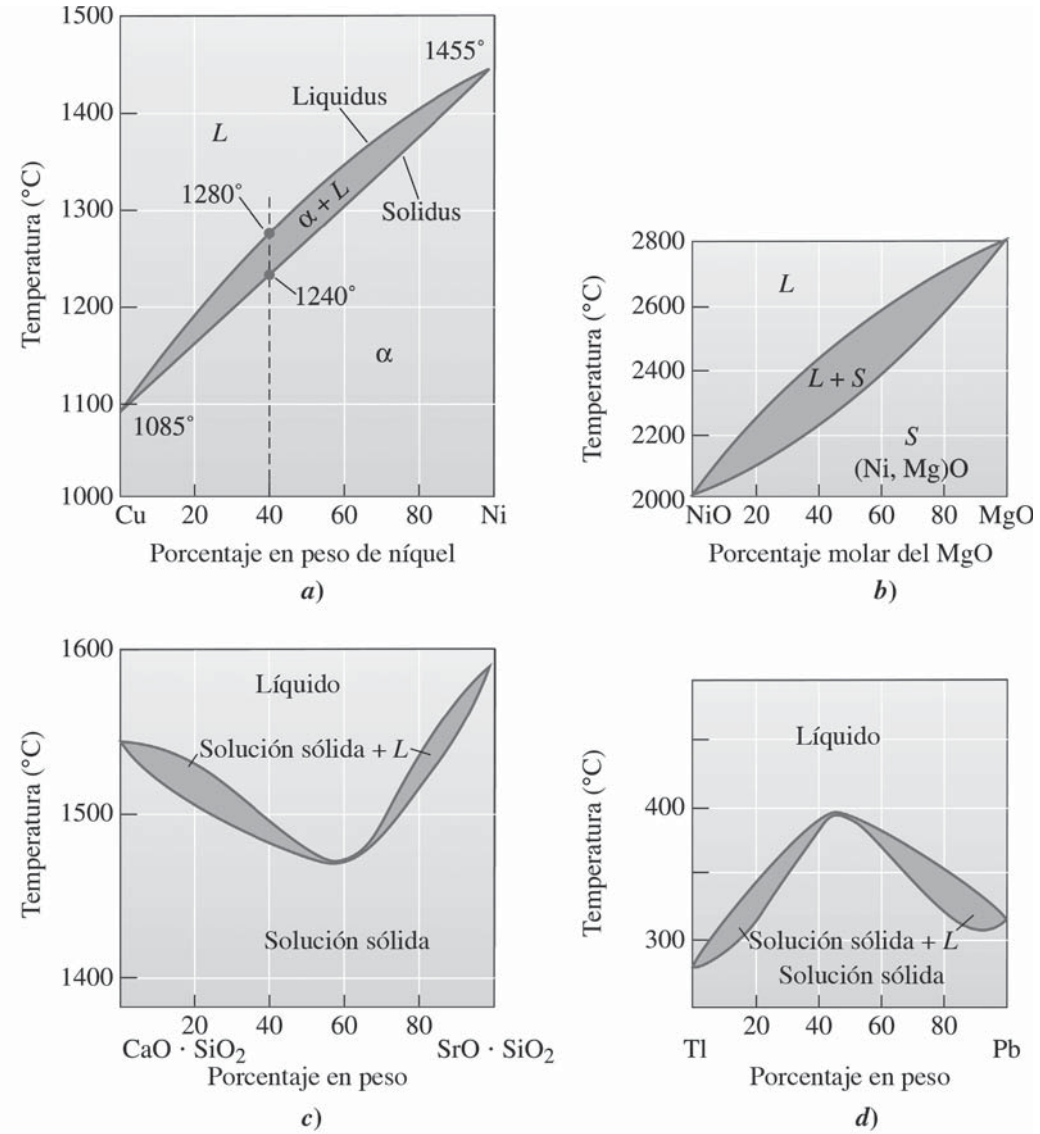


Figura 10-8 *a*) y *b*) Diagramas de fases de equilibrio de los sistemas de Cu-Ni y NiO-MgO. Se muestran las temperaturas de liquidus y solidus de una aleación de Cu-40% Ni. *c*) y *d*) Sistemas con máximos y mínimos de solución sólida. (*Basada en* Introduction to Phase Equilibria, *de C. G. Bergeron y S. H. Risbud, American Ceramic Society, 1984*.)

Observe que la escala horizontal puede representar el porcentaje molar o porcentaje en peso de uno de los componentes. Además, se puede graficar el porcentaje atómico o la fracción molar de uno de los componentes. También, observe que el diagrama del $CaO \cdot SiO_2$ y el $SrO \cdot SiO_2$ podría graficarse como un *diagrama de fases ternario*. Un diagrama de fases ternario es un diagrama de fases de sistemas conformados por tres componentes. Aquí se representa como un *diagrama seudobinario* (es decir, se supone que es un diagrama que representa el equilibrio de fases entre el $CaO \cdot SiO_2$ y el $SrO \cdot SiO_2$). En los diagramas seudobinarios se representan los equilibrios entre tres o más componentes utilizando dos compuestos. Con frecuencia, los diagramas de fases ternarios se encuentran en sistemas cerámicos y metálicos.

En fechas recientes se han realizado desarrollos considerables en diagramas de fases que emplean bases de datos de computadora que contienen propiedades termodinámicas de los distintos elementos y compuestos. Existen varias piezas de información valiosas que se obtienen a partir de los diagramas de fases, como sigue.

Temperaturas de liquidus y solidus

Se define la **temperatura de liquidus** como la temperatura por encima de la cual un material es completamente líquido. La curva superior de la figura 10-8*a*), conocida como **liquidus**, representa las temperaturas de liquidus de aleaciones de cobre-níquel de distintas composiciones. Se debe calentar una aleación de cobre-níquel por encima de la temperatura de liquidus para producir una aleación completamente líquida que puede colarse para producir una forma útil. La aleación líquida comienza a solidificarse cuando la temperatura disminuye a la temperatura de liquidus. En el caso de la aleación de Cu-40% Ni de la figura 10-8*a*), la temperatura de liquidus es de 1,280°C.

La **temperatura de solidus** es la temperatura por debajo de la cual la aleación es totalmente sólida. La curva inferior de la figura 10-8*a*), conocida como **solidus**, representa las temperaturas de solidus en el caso de aleaciones de Cu-Ni de distintas composiciones. Una aleación de cobre-níquel no es sólida por completo hasta que el material se enfría por debajo de la temperatura de solidus. Si se utiliza una aleación de cobre-níquel a alta temperatura, se debe asegurar que la temperatura de servicio esté por debajo de la de solidus para que no ocurra una fusión. En el caso de la aleación de Cu-40% Ni de la figura 10-8*a*) la temperatura de solidus es de 1240°C.

Las aleaciones de cobre-níquel se funden y solidifican en un intervalo de temperaturas entre la de liquidus y la de solidus. La diferencia entre las temperaturas de liquidus y solidus es el **intervalo de solidificación** de la aleación. Dentro de este intervalo, coexisten dos fases: una líquida y una sólida. La sólida es una solución de átomos de cobre y níquel y se designa como la fase α. En el caso de la aleación de Cu-40% Ni de la figura 10-8*a*), el intervalo de solidificación es de $1280 - 1240 = 40$°C. Observe que los metales puros se solidifican a una temperatura fija (es decir, el intervalo de solidificación es de cero grados).

Fases presentes

Con frecuencia se desea saber qué fases están presentes en una aleación a una temperatura específica. Si se desea producir una pieza colada, se debe asegurar que el metal es inicialmente líquido por completo; si se planea tratar térmicamente un componente de aleación, se debe asegurar que no se forme ningún líquido durante el proceso. Diferentes fases sólidas tienen distintas propiedades. Por ejemplo, el Fe CCCu (indicado como la fase α en el diagrama de fases de hierro-carbono) es ferromagnético; sin embargo, el hierro CCCa (indicado como la fase γ en el diagrama de Fe-C) no lo es.

El diagrama de fases puede estudiarse como un mapa de carreteras; si se conocen las coordenadas —la temperatura y la composición de la aleación— se pueden determinar las fases presentes, suponiendo que se sabe que existe equilibrio termodinámico. Se conocen muchos ejemplos de situaciones tecnológicamente importantes donde no se desea que se formen fases en equilibrio. Por ejemplo, en la formación del vidrio de silicato, se desea que se forme un vidrio amorfo y no SiO_2 cristalino. Cuando se endurecen los aceros enfriándolos de manera rápida desde una temperatura alta, el endurecimiento ocurre debido a la formación de fases que no están en equilibrio. En tales casos, los diagramas de fases no proporcionarán toda la información que se requiere, y es necesario recurrir a diagramas especiales que tomen en cuenta el efecto del tiempo (es decir, la cinética) sobre las transformaciones de fase. En capítulos posteriores se estudiará el uso de tales diagramas.

Los siguientes dos ejemplos ilustran las aplicaciones de algunos de estos conceptos.

Ejemplo 10-4 *Sistema isomorfo de NiO-MgO*

A partir del diagrama de fases del sistema binario NiO-MgO [figura 10-8*b*)], describa una composición que puede fundirse a 2600°C pero que no se funda cuando se coloque en servicio a 2300°C.

SOLUCIÓN

El material debe tener una temperatura de liquidus por debajo de 2600°C, pero una temperatura de solidus por encima de 2300°C. El diagrama de fases de NiO-MgO [figura 10-8*b*)] permite elegir la composición apropiada.

Para identificar una composición con una temperatura de liquidus por debajo de 2600°C debe haber menos de 60% de MgO molar en el refractario. Para identificar una composición con una temperatura de solidus por encima de 2300°C, debe estar presente por lo menos 50% de MgO molar. En consecuencia, se puede utilizar cualquier composición entre 50 y 60% de MgO molar.

Ejemplo 10-5 *Diseño de un material compuesto*

Un método para mejorar la tenacidad a la fractura de un material cerámico (capítulo 7) es reforzar la matriz cerámica con fibras cerámicas. Un diseñador de materiales le sugiere que el Al_2O_3 podría reforzarse con 25% de fibras de Cr_2O_3, las cuales interferirían con la propagación de cualquier grieta en la alúmina. Se espera que el compuesto resultante opere bajo carga a 2000°C por varios meses.

Utilice la figura 10-9 para criticar la idoneidad de este diseño.

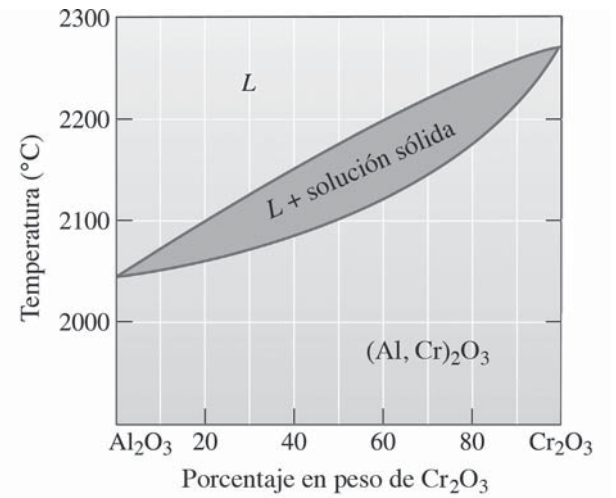


Figura 10-9 Diagrama de fases de Al_2O_3-Cr_2O_3 (ejemplo 10-5).

SOLUCIÓN

Dado que el compuesto operará a temperaturas altas por un periodo sustancial, las dos fases —las fibras de Cr_2O_3 y la matriz de Al_2O_3— no deben reaccionar entre sí. Además, el compuesto debe permanecer sólido por lo menos hasta 2000°C. El diagrama de fases de la figura 10-9 permite considerar esta elección para un compuesto.

El Cr_2O_3 puro, el Al_2O_3 puro, y la aleación de Al_2O_3-25% Cr_2O_3 tienen temperaturas de solidus por encima de 2000°C; en consecuencia, no hay peligro de fundir cualquiera de los constituyentes; sin embargo, el Cr_2O_3 y el Al_2O_3 muestran solubilidad sólida ilimitada. A una temperatura de servicio alta, de 2000°C, los iones Al^{+3} se difundirán de la matriz hacia las fibras y reemplazarán los iones Cr^{+3} que se encuentran en éstas. De forma simultánea, los iones Cr^{+3} reemplazarán los iones Al^{+3} en la matriz. Mucho antes de que hayan transcurrido varios meses, este proceso de difusión provocará que las fibras se disuelvan por completo en la matriz. Ya sin fibras, la tenacidad a la fractura será de nuevo mala.

Composición de cada fase

En cada fase se puede especificar una composición, expresada como el porcentaje de cada elemento en ella. Por lo general, la composición se expresa en porcentaje en peso (%p). Cuando sólo está presente una fase en la aleación o solución sólida cerámica, la composición de la fase es igual a la composición total del material. Si la composición original de una aleación o de un material cerámico con una sola fase cambia, la composición de la fase también debe hacerlo.

Cuando dos fases, como la líquida y la sólida, coexisten, sus composiciones difieren entre sí y también de la composición general original. En este caso, si la composición original cambia ligeramente, la composición de las dos fases no se ve afectada, siempre que la temperatura permanezca constante.

Esta diferencia se explica por medio de la regla de las fases de Gibbs. En este caso, a diferencia del ejemplo del magnesio puro descrito, se mantiene fija la presión a una atmósfera, que es

la normal en los diagramas de fases binarios. La regla de las fases dada por la ecuación 10-1 puede reescribirse como

$$1 + C = F + P \text{ (con presión constante)} \tag{10-2}$$

donde, de nuevo, C es el número de componentes químicos independientes, P el número de fases (*no de presión*) y F el número de grados de libertad. En este caso se utiliza el número 1 en vez del 2, debido a que la presión se mantiene constante. Esto reduce el número de grados de libertad en 1. Por lo general la presión es, aunque no necesariamente, de una atmósfera. En un sistema binario, el número de componentes C es dos; los grados de libertad que se han incluido cambian la temperatura y la composición de las fases presentes. Se puede aplicar esta forma de la regla de las fases al sistema de Cu-Ni, como se muestra en el ejemplo 10-6.

Ejemplo 10-6 *Regla de Gibbs en un diagrama de fases isomorfo*

Determine los grados de libertad en una aleación de Cu-40% Ni a *a*) 1300°C, *b*) 1250°C y *c*) 1200°C. Utilice la figura 10-8*a*).

SOLUCIÓN

Este es un sistema binario ($C = 2$). Los dos componentes son el Cu y el Ni. Se supondrá una presión constante. Por lo tanto, puede utilizarse la ecuación 10-2 ($1 + C = F + P$) como se muestra:
a) A 1300°C, $P = 1$, dado que sólo está presente una fase (líquida); $C = 2$, dado que están presentes átomos de cobre y níquel. Por lo tanto,

$$1 + C = F + P \quad \therefore 1 + 2 = F + 1 \text{ o } F = 2$$

Se deben fijar la temperatura y la composición de la fase líquida para describir por completo el estado de la aleación de cobre-níquel en la región líquida.
b) A 1250°C, $P = 2$, dado que están presentes las fases líquida y sólida; $C = 2$, dado que están presentes átomos de cobre y níquel. Ahora,

$$1 + C = F + P \quad \therefore 1 + 2 = F + 2 \text{ o } F = 1$$

Si se fija la temperatura en la región de las dos fases, también se fijan las composiciones de ambas. Asimismo, si se fija la composición de una fase, la temperatura y la composición de la segunda fase se fijan de manera automática.
c) A 1200°C, $P = 1$, dado que sólo se presenta una fase (sólida); $C = 2$, dado que están presentes átomos de cobre y níquel. De nuevo,

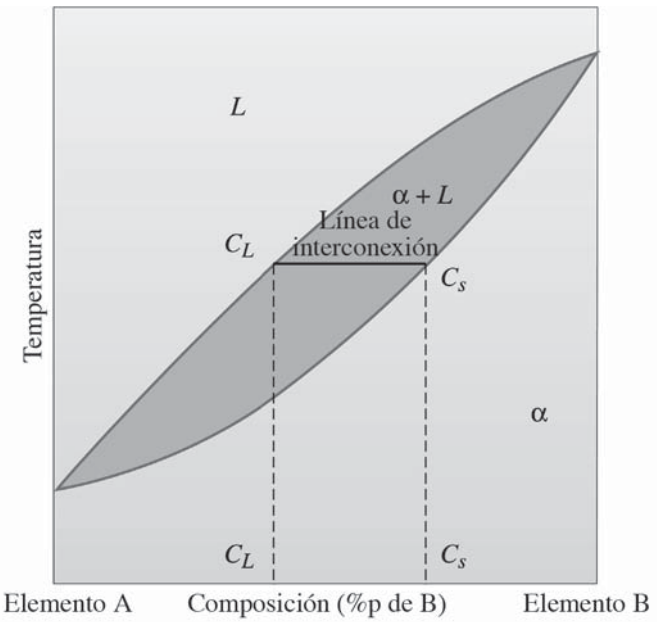
$$1 + C = F + P \quad \therefore 1 + 2 = F + 1 \text{ o } F = 2$$

y se deben fijar la temperatura y la composición para describir por completo el estado del sólido.

Debido a que hay sólo un grado de libertad en una región de dos fases de un diagrama de fases binario, las composiciones de las dos fases siempre se fijan cuando se especifica la temperatura. Esto es verdadero incluso si cambia la composición general de la aleación. Por lo tanto, se puede utilizar una línea de interconexión para determinar la composición de las dos fases. Una **línea de interconexión** es una línea horizontal dentro de una región de dos fases trazada a la temperatura de interés (figura 10-10). En un sistema isomorfo, la línea de interconexión conecta los puntos de liquidus y solidus a la temperatura especificada. Los extremos de la línea de interconexión representan las composiciones de las dos fases en equilibrio. Las líneas de interconexión no se utilizan en regiones de una sola fase debido a que no existen dos fases que se tengan que "interconectar".

En cualquier aleación con una composición general o voluminosa que se encuentre entre c_L y c_S, la composición del líquido es c_L y la composición del sólido α es c_S.

El siguiente ejemplo ilustra cómo se emplea el concepto de línea de interconexión para determinar la composición de las distintas fases en equilibrio.



igura 10-10 Diagrama de fases inario hipotético entre dos elementos, . y B. Cuando se presenta una aleación n una región de dos fases, una línea e interconexión a la temperatura de nterés fija la composición de las dos ases. Este resultado es una consecuencia e la regla de las fases de Gibbs, la cual torga sólo un grado de libertad en la egión de dos fases.

En el ejemplo 10-7 se encuentra que, en la región de dos fases, el sólido α contiene más níquel y el líquido L contiene más cobre que la composición general de la aleación. Por lo general, el elemento con el punto de fusión más alto (en este caso, el níquel) se concentra en el primer sólido que se forma.

Ejemplo 10-7 *Composiciones de las fases en el diagrama de fases de Cu-Ni*

Determine la composición de cada fase en una aleación de Cu-40% Ni a 1300°C, 1270°C, 1250°C y 1200°C (vea la figura 10-11).

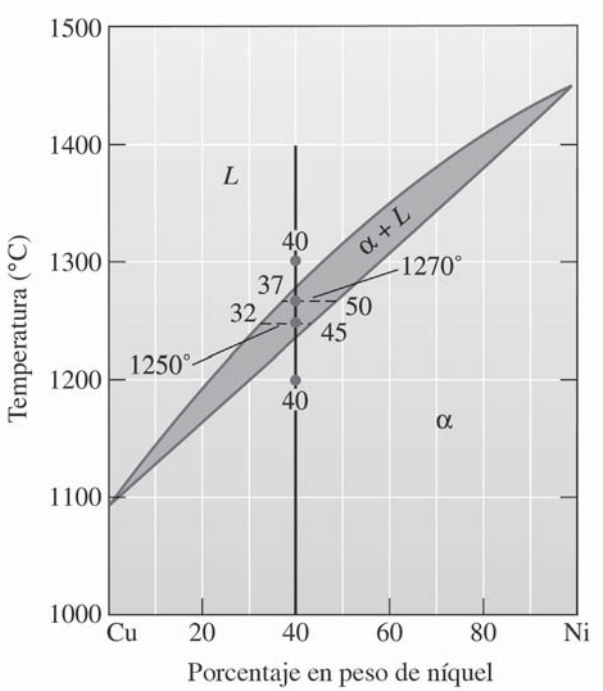


Figura 10-11 Líneas de interconexión y composiciones de las fases de una aleación de Cu-40% Ni a varias temperaturas (ejemplo 10-7).

SOLUCIÓN

La línea vertical a 40% de Ni representa la composición general de la aleación:

- 1300°C: Sólo hay líquido, que debe contener 40% de Ni, la composición general de la aleación.
- 1270°C: Se presentan dos fases. Se traza una línea horizontal dentro del campo $\alpha + L$. El punto extremo del liquidus, el cual está en contacto con la región líquida, está a 37% de Ni. El punto extremo del solidus, el cual está en contacto con la región α, está a 50% de Ni. Por lo tanto, el líquido contiene 37% de Ni y el sólido 50% de Ni.
- 1250°C: De nuevo se presentan dos fases. La línea de interconexión trazada a esta temperatura muestra que el líquido contiene 32% de Ni y el sólido 45% de Ni.
- 1200°C: Sólo se presenta el sólido α, que debe contener 40% de Ni.

Cantidad de cada fase (regla de la palanca)

Por último, el interés radica en las cantidades relativas de cada fase presentes en la aleación. Por lo general, estas cantidades se expresan como porcentaje en peso (%p). Las cantidades absolutas de las distintas fases se expresan en unidades de masa o peso (gramos, kilogramos, libras, etc.). El siguiente ejemplo ilustra el raciocinio de la **regla de la palanca**.

Para calcular las cantidades del líquido y el sólido, se construye una palanca sobre la línea de interconexión, con el fulcro en la composición original de la aleación. El brazo de la palanca *opuesto* a la composición de la fase, cuya cantidad se desea calcular, se divide entre la longitud total de la palanca para obtener la cantidad de esa fase. En el ejemplo 10-8, observe que el denominador representa la longitud total de la línea de interconexión y el numerador es la porción de la palanca *opuesta* a la composición del sólido que se trata de calcular.

En general, la regla de la palanca puede escribirse como

$$\text{Porcentaje de la fase} = \frac{\text{brazo opuesto de la palanca}}{\text{longitud total de la línea de interconexión}} \times 100 \tag{10-3}$$

Se puede aplicar la regla de la palanca en cualquier región de dos fases de un diagrama de fases binario. El cálculo de la regla de la palanca no se emplea en regiones con una sola fase, debido a que la respuesta es trivial (hay 100% de esa fase presente). La regla de la palanca se emplea para calcular la fracción relativa o porcentaje de una fase en una mezcla de dos fases. Los puntos extremos de la línea de interconexión se utilizan para obtener la composición (es decir, la concentración química de los diferentes componentes) de cada fase.

El siguiente ejemplo refuerza la aplicación de la regla de la palanca para calcular las cantidades de las fases de una aleación a distintas temperaturas. Esta es una manera de mantener un registro del comportamiento de la solidificación de las aleaciones, algo que no se vio en el capítulo 9.

En algunas ocasiones se desea expresar la composición como porcentaje atómico (%at) en vez de porcentaje en peso (%p). En el caso de una aleación de Cu-Ni, donde M_{Cu} y M_{Ni} son los pesos moleculares, las siguientes ecuaciones ofrecen ejemplos para realizar estas conversiones:

$$\%\text{at Ni} = \left(\frac{\dfrac{\%\text{p Ni}}{M_{Ni}}}{\dfrac{\%\text{p Ni}}{M_{Ni}} + \dfrac{\%\text{p Cu}}{M_{Cu}}} \right) \times 100 \tag{10-4}$$

$$\%\text{p Ni} = \left(\frac{\text{at\% Ni} \times M_{Ni}}{\%\text{at Ni} \times M_{Ni} + \%\text{at Cu} \times M_{Cu}} \right) \times 100 \tag{10-5}$$

Ejemplo 10-8 *Aplicación de la regla de la palanca*

Calcule las cantidades de α y L a 1250°C en la aleación de Cu-40% Ni que se muestra en la figura 10-12.

SOLUCIÓN

Sea x = la fracción másica de la aleación que es el sólido α. Dado que sólo se tienen dos fases, el balance de la aleación debe estar en la fase líquida (L). Por lo tanto, la fracción másica del líquido será $1 - x$. Considere 100 gramos de la aleación. Esta aleación consistirá en 40 gramos de níquel a todas las temperaturas. A 1250°C se escribe una ecuación que represente el balance másico del níquel. A esta temperatura se tienen $100x$ gramos de la fase α. Se tienen $100(1 - x)$ gramos de líquido.

$$\text{Masa total del níquel en 100 gramos de la aleación} = \begin{array}{l}\text{masa del níquel en el líquido} \\ + \text{masa del níquel en } \alpha\end{array}$$

$$\therefore (100)\,(\%\text{ de Ni en la aleación}) = [(100)(1 - x)](\%\text{ de Ni en } L)\,(100)(x)(\%\text{ de Ni en } \alpha)$$

$$\therefore (\%\text{ de Ni en la aleación}) = (\%\text{ de Ni en } L)(1 - x) + (\%\text{ de Ni en } \alpha)(x)$$

Multiplicando y reacomodando,

$$x = \frac{(\%\text{ de Ni en la aleación}) - (\%\text{ de Ni en } L)}{(\%\text{ de Ni en } \alpha) - (\%\text{ de Ni en } L)}$$

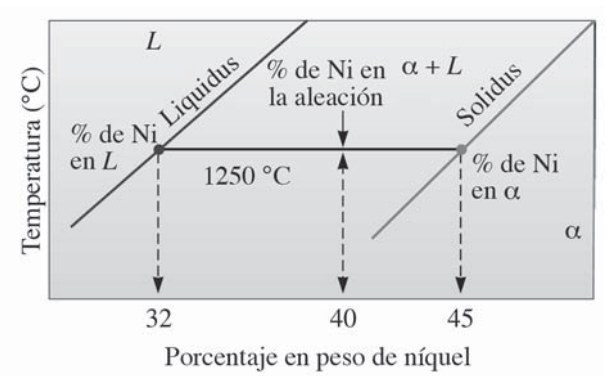


Figura 10-12 Línea de interconexión a 1250°C en el sistema cobre-níquel que se utiliza en el ejemplo 10-8 para encontrar la cantidad de cada fase.

A partir del diagrama de fases a 1250°C:

$$x = \frac{40 - 32}{45 - 32} = \frac{8}{13} = 0.62$$

Si se convierte de fracción en masa a porcentaje en masa, la aleación a 1250°C contiene 62% α y 38% L. Observe que la concentración del Ni en la fase α (a 1250°C) es de 45% y la concentración del níquel en la fase líquida (a 1250°C) es de 32%.

Ejemplo 10-9 *Solidificación de una aleación de Cu-40% Ni*

Determine la cantidad de cada fase en la aleación de Cu-40% Ni que se muestra en la figura 10-11 a 1300°C, 1270°C, 1250°C y 1200°C.

SOLUCIÓN

- **1300°C**: Sólo hay una fase, por lo que es 100% L.
- **1270 °C**: $\%\text{ de } L = \dfrac{50 - 40}{50 - 37} \times 100 = 77\%$

$$\%\text{ de } \alpha = \frac{40 - 37}{50 - 37} \times 100 = 23\%$$

- **1250 °C**: % de $L = \dfrac{45 - 40}{45 - 32} \times 100 = 38\%$

  % de $\alpha = \dfrac{40 - 32}{45 - 32} \times 100 = 62\%$
- **1200°C**: Sólo hay una fase, por lo que es 100% α.

Observe que a cada temperatura se puede determinar la composición de las fases en equilibrio a partir de los extremos de la línea de interconexión trazada a esa temperatura.

Al principio esto puede parecer un poco extraño. ¿Cómo cambia su composición la fase α? Esta fase líquida también cambia su composición y las cantidades de cada fase varían con la temperatura a medida que la aleación se enfría del liquidus al solidus.

10-6 Relación entre las propiedades y el diagrama de fases

Se ha explicado que una aleación de cobre-níquel es más resistente que el cobre puro o que el níquel puro debido al endurecimiento por solución sólida. Las propiedades mecánicas de una serie de aleaciones de cobre-níquel pueden relacionarse con el diagrama de fases que se muestra en la figura 10-13.

La resistencia del cobre aumenta por endurecimiento por solución sólida hasta que se agrega alrededor de 67% de Ni. El níquel puro es endurecido por solución sólida cuando se le incorpora hasta 33% de Cu. Se obtiene la resistencia máxima de una aleación de Cu-67% Ni, conocida como *Monel*. El máximo está más cerca del lado del níquel puro del diagrama de fases debido a que el níquel puro es más resistente que el cobre puro.

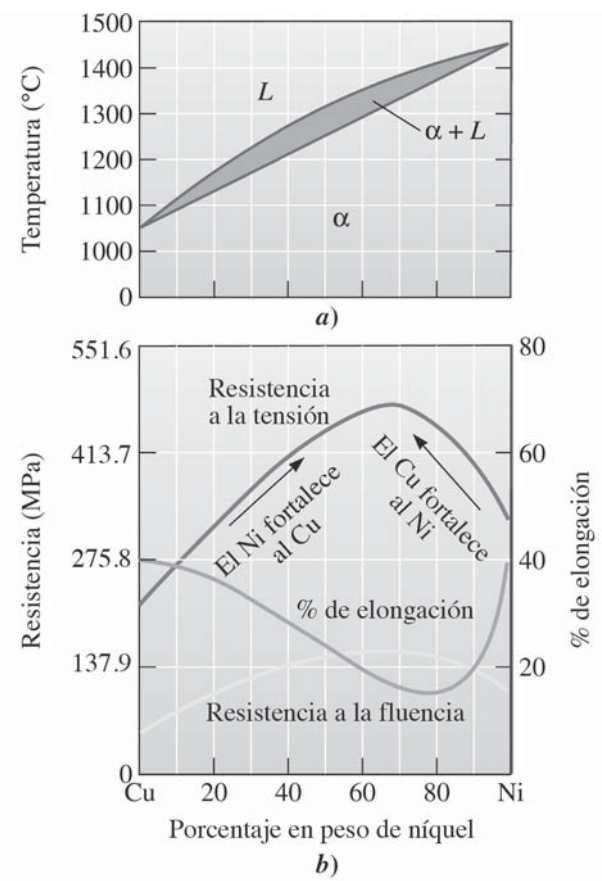


Figura 10-13 *a*) Diagrama de fases de equilibrio del sistema Cu-Ni. La escala del eje horizontal es la misma de *b*). *b*) Propiedades mecánicas de las aleaciones de cobre-níquel. El cobre es endurecido cuando se le agrega hasta 67% de Ni y el níquel es endurecido con hasta 33% de Cu.

Ejemplo 10-10 *Diseño de un procedimiento de fusión para una fundición*

Se necesita producir una aleación de Cu-Ni que tenga una resistencia a la fluencia (límite elástico) mínima de 138 MPa, una resistencia a la tensión mínima de 414 MPa y un porcentaje de elongación mínimo de 20%. Tiene en su inventario una aleación de Cu-20% Ni y níquel puro. Diseñe un método para producir fundiciones que posean las propiedades que se exigen.

SOLUCIÓN

A partir de la figura 10-13, se determina la composición que se necesita de la aleación. Para cumplir la resistencia a la fluencia que se requiere, la aleación debe contener entre 40 y 90% de Ni; en el caso de la resistencia a la tensión, se requiere de 40 a 88% de Ni. El porcentaje de elongación deseado puede obtenerse en aleaciones que contengan menos de 60% de Ni o más de 90% de Ni. Para satisfacer estas condiciones, se podría utilizar Cu-40% a 60% de Ni.

Se prefiere seleccionar una aleación con un bajo contenido de níquel, dado que este elemento es más caro que el cobre. Además, las aleaciones con menos níquel tienen un liquidus menor, lo que permite que se produzcan fundidos con menos energía. Por lo tanto, una aleación razonable es Cu-40% Ni.

Para producir esta composición a partir del inventario de fundido disponible se debe mezclar un poco del níquel puro con el lingote de Cu-20% Ni. Suponga que se desea producir 10 kg de la aleación. Sea x la masa de la aleación de Cu-20% Ni que se necesitará. La masa del Ni puro necesaria será $10 - x$. Dado que la aleación final consiste en 40% de Ni, la masa total de Ni necesario será

$$(10\text{ kg})\left(\frac{40\%\text{ Ni}}{100\%}\right) = 4\text{ kg Ni}$$

A continuación se escribe el balance de masa del níquel. La suma del níquel a partir de la aleación de Cu-20% Ni y el níquel puro debe ser igual al níquel total en la aleación de Cu-40% Ni que se está produciendo:

$$(x)\left(\frac{20\%\text{ Ni}}{100\%}\right) + (10 - x)\left(\frac{100\%\text{ Ni}}{100\%}\right) = 4\text{ kg Ni}$$

$$0.2x + 10 - x = 4$$

$$6 = 0.8x$$

$$x = 7.5\text{ kg}$$

Por lo tanto, se necesita fundir 7.5 kg de Cu-20% Ni con 2.5 kg de níquel puro para producir la aleación que se requería. Después se debe calentar la aleación por encima de la temperatura de liquidus, la cual es de 1280°C en el caso de la aleación de Cu-40% Ni, antes de verter el metal líquido en un molde apropiado.

Se deben realizar tales cálculos para varias situaciones prácticas que traten con el procesamiento de aleaciones, debido a que cuando se producen, por lo general se emplean materiales nuevos y reciclados.

10-7 Solidificación de una aleación de solución sólida

Cuando se funde y enfría una aleación como la de Cu-40% Ni, la solidificación requiere formación de núcleos y crecimiento. La nucleación heterogénea permite poco o ningún subenfriamiento, por lo que la solidificación comienza cuando el líquido alcanza la temperatura de liquidus (capítulo 9). El diagrama de fases (figura 10-14), con una línea de interconexión trazada a la temperatura de liquidus, indica que el *primer sólido que se formará* tiene una composición de Cu-52% Ni.

Se requieren dos condiciones para el crecimiento del sólido α. Primero, se requiere que se elimine el calor latente de fusión (ΔH_f), el cual evoluciona a medida que se solidifica el líquido, de la interfase sólido-líquido. Segundo, a diferencia del caso de los metales puros, debe ocurrir difusión para que las composiciones de las fases sólida y líquida sigan las curvas de solidus y de liquidus

durante el enfriamiento. Se elimina el calor latente de fusión (ΔH_f) en un intervalo de temperaturas para que la curva de enfriamiento muestre un cambio en la pendiente, en vez de una meseta plana (figura 10-15). Por lo tanto, como se explicó en el capítulo 9, la solidificación de las aleaciones es distinta de la que ocurre en los metales puros.

Al comienzo de la solidificación, el líquido contiene Cu-40% Ni y el primer sólido contiene Cu-52% Ni. Los átomos de níquel deben haberse difundido y concentrado en el primer sólido

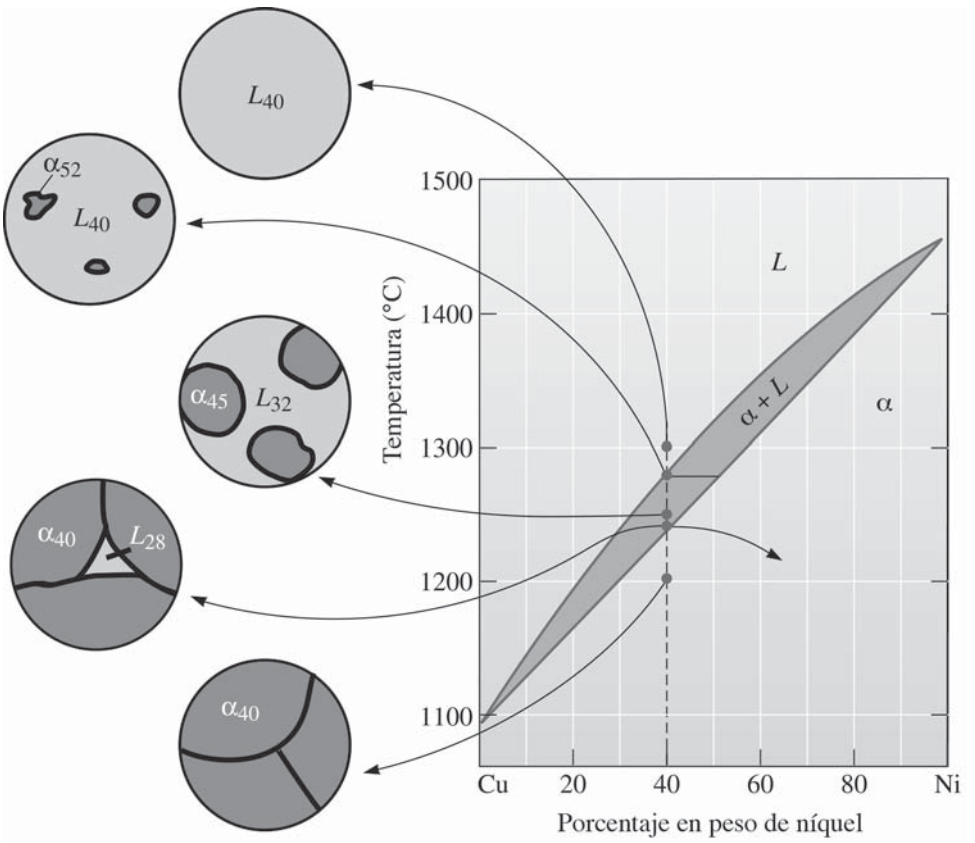


Figura 10-14 Cambio en la estructura de una aleación de Cu-40% Ni durante la solidificación en equilibrio. Los átomos de níquel y cobre deben difundirse durante el enfriamiento para satisfacer el diagrama de fases y producir una estructura uniforme de equilibrio.

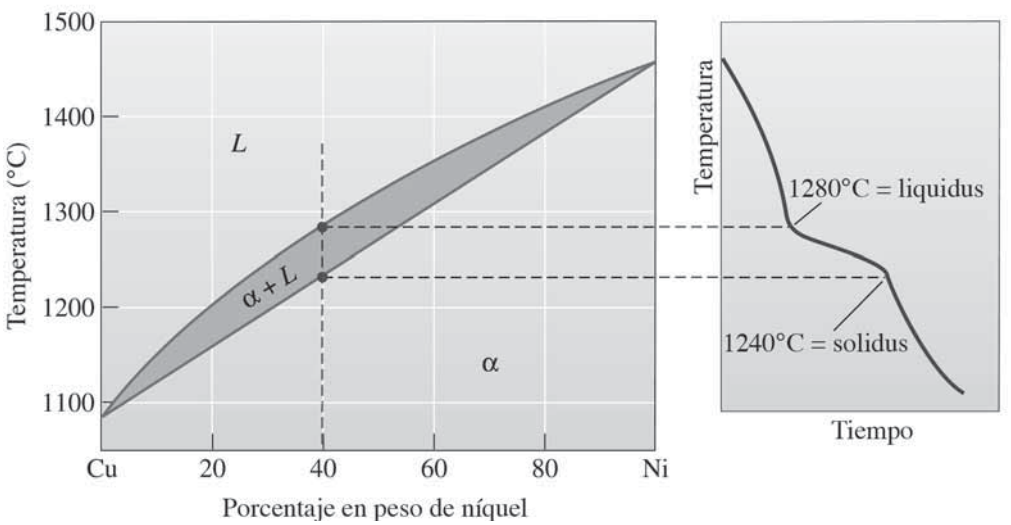


Figura 10-15 Curva de enfriamiento de una aleación isomorfa durante la solidificación. Se supone que las velocidades de enfriamiento son bajas, por lo que se mantiene el equilibrio térmico a cada temperatura. Los cambios en la pendiente de la curva de enfriamiento indican las temperaturas de liquidus y solidus, en este caso, de una aleación de Cu-40% Ni.

que se formará. Después del enfriamiento a 1250°C, la solidificación ha avanzado y el diagrama de fases indica que ahora todo el líquido debe contener 32% de Ni y todo el sólido debe contener 45% de Ni. En el enfriamiento del liquidus a 1250°C, algunos átomos de níquel deben difundirse del primer sólido al nuevo sólido, lo cual reduce el níquel del primer sólido. Los átomos de níquel adicionales se difunden del líquido solidificándose en el nuevo sólido. Mientras tanto, los átomos de cobre se han concentrado —por difusión— en el líquido restante. Este proceso debe continuar hasta que se alcance la temperatura de solidus, donde el último líquido que se solidificará, que contiene Cu-28% Ni, se solidifica y forma un sólido que contiene Cu-40% Ni. Justo debajo de solidus, todo el sólido debe contener una concentración uniforme de 40% de Ni.

Para alcanzar esta estructura final en equilibrio, la velocidad de enfriamiento debe ser extremadamente lenta. Debe otorgárseles el tiempo suficiente para que los átomos de cobre y níquel se difundan y produzcan las composiciones dadas en el diagrama de fases. En muchas situaciones prácticas de fundición, la velocidad de enfriamiento es tal que permite el equilibrio. Por lo tanto, en la mayoría de las fundiciones que se producen a partir de aleaciones se espera que se presenten diferencias en la composición, fenómeno conocido como **segregación química**.

10-8 Solidificación y segregación fuera de equilibrio

En el capítulo 5 se estudiaron las fuerzas termodinámica y cinética impulsoras de la difusión. Se sabe que la difusión se lleva a cabo en forma más rápida en los gases, seguida por los líquidos y después por los sólidos. También se vio que el incremento de la temperatura incrementa la velocidad de difusión. Cuando el enfriamiento es demasiado rápido como para que los átomos se difundan y produzcan las condiciones de equilibrio, se producen estructuras fuera de equilibrio en la pieza colada. Observe lo que le sucede a la aleación de Cu-40% Ni en el enfriamiento rápido.

De nuevo, el primer sólido, que contiene 52% de Ni, se forma cuando alcanza la temperatura de liquidus (figura 10-16). En el enfriamiento a 1260°C, la línea de interconexión indica que el líquido

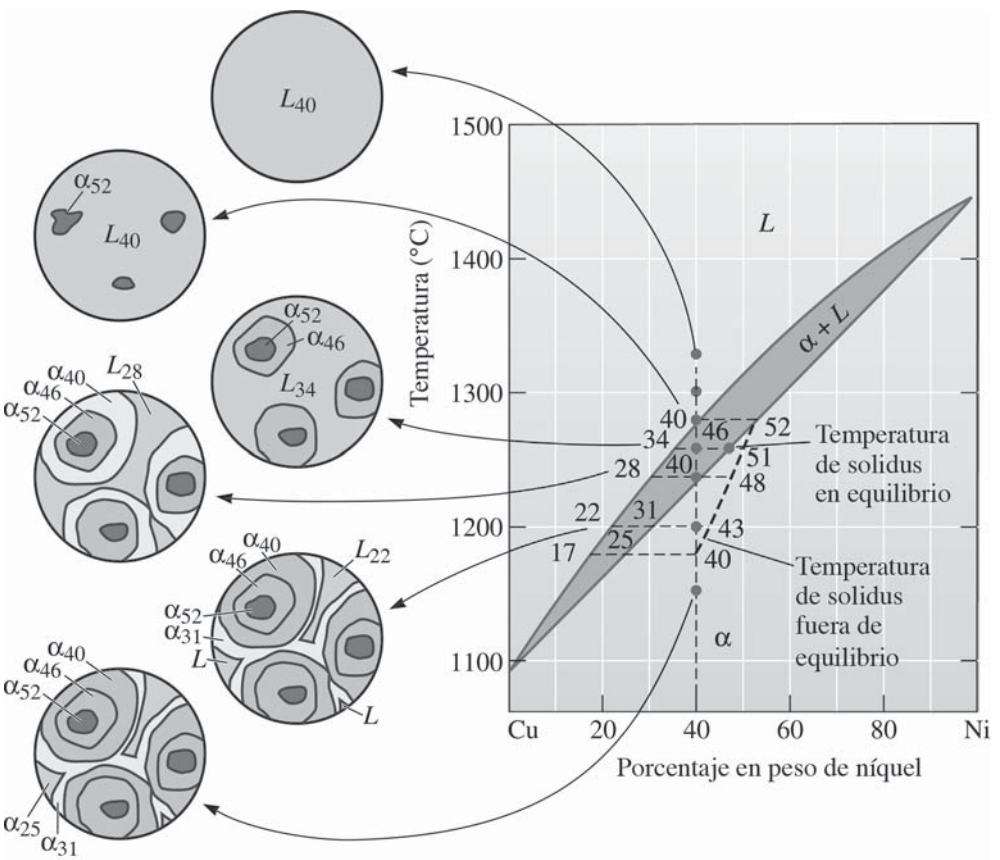


Figura 10-16 Cambio en la estructura de una aleación de Cu-40% Ni durante un proceso de solidificación fuera de equilibrio. El tiempo insuficiente para la difusión en el sólido produce una estructura segregada. Observe la curva de solidus fuera de equilibrio.

contiene 34% de Ni y el sólido que se forma a esa temperatura contiene 46% de este elemento. Dado que la difusión se lleva a cabo de manera rápida en los líquidos, se espera que la línea de interconexión pronostique con precisión la composición del líquido; sin embargo, si se compara, la difusión en los sólidos es lenta. El primer sólido que se forma aún conserva alrededor de 52% de Ni, pero el sólido nuevo sólo contiene 46%. Se podría encontrar que la composición promedio del sólido muestra 51% de Ni. Esto da un solidus fuera de equilibrio distinto del que da el diagrama de fases. A medida que continúa la solidificación, la línea de solidus fuera de equilibrio continúa separándose del solidus en equilibrio.

Cuando la temperatura alcanza los 1240°C (solidus en equilibrio), aún queda una cantidad significativa del líquido. Éste no se solidificará por completo hasta que se enfríe a 1180°C, donde el solidus fuera de equilibrio intersecta la composición original de 40% de Ni. A esa temperatura el líquido que contiene 17% de Ni se solidifica, lo que da un sólido que contiene 25% de Ni. El último líquido que se solidificará contiene por tanto 17% de Ni y el último sólido en formarse contiene 25% de Ni. La composición promedio del sólido es 40% de Ni, pero ella no es uniforme.

La ubicación real de la línea de solidus fuera de equilibrio y de la temperatura de solidus fuera de equilibrio final depende de la velocidad de enfriamiento. Las mayores velocidades de enfriamiento provocan que se aleje más del equilibrio. El siguiente ejemplo ilustra cómo se pueden tomar en cuenta los cambios en la composición en condiciones fuera de equilibrio.

Ejemplo 10-11 *Solidificación fuera de equilibrio de aleaciones de Cu-Ni*

Calcule la composición y la cantidad de cada fase en una aleación de Cu-40% Ni que está presente en las condiciones fuera de equilibrio que se muestran en la figura 10-16 a 1300°C, 1280°C, 1260°C, 1240°C, 1200°C y 1150°C. Compárelas con las composiciones y las cantidades de cada fase en equilibrio.

SOLUCIÓN

Se utiliza la línea de interconexión a temperatura de solidus en equilibrio en la curva para calcular las composiciones y los porcentajes de las fases con base en la regla de la palanca. De manera similar, se utiliza la curva de la temperatura de solidus fuera de equilibrio para calcular los porcentajes y las concentraciones de las distintas fases formadas en las condiciones fuera de equilibrio.

Temperatura	Equilibrio	Fuera de equilibrio
1300°C	L: 40% Ni 100% L	L: 40% Ni 100% L
1280°C	L: 40% Ni 100% L	L: 40% Ni 100% L
1260°C	L: 34% Ni $\frac{46-40}{46-34} = 50\%$	: 34% Ni $\frac{51-40}{51-34} = 65\%$ L
	α: 46% Ni $\frac{40-34}{46-34} = 50\%$	: 51% Ni $\frac{40-34}{51-34} = 35\%$ α
1240°C	L: 28% Ni ~ 0% L	L: 28% Ni $\frac{48-40}{48-28} = 40\%$ L
	α: 40% Ni 100% α	α: 48% Ni $\frac{40-28}{48-28} = 60\%$ α
1200°C	α: 40% Ni 100% α	L: 22% Ni $\frac{43-40}{43-22} = 14\%$ L
		α: 43% Ni $\frac{40-22}{43-22} = 86\%$ α
1150°C	α: 40% Ni 100% α	α: 40% Ni 100% α

Microsegregación A la composición no uniforme que produce la solidificación fuera de equilibrio se le conoce como segregación. La **microsegregación**, también conocida como **segregación interdendrítica** y **segregación central**, ocurre en distancias cortas, con frecuencia entre los pequeños brazos dendríticos. Los centros de las dendritas, que representan el primer sólido que se forma, son ricos en el elemento con el punto de fusión más alto de la aleación. Las regiones entre las dendritas son ricas en el elemento con el punto de fusión más bajo, dado que estas regiones representan el último líquido que se solidifica. La composición y las propiedades de la fase α (en el caso de las aleaciones de Cu-Ni) difieren de una región a otra y se espera que, como resultado, las propiedades de la pieza colada se deterioren.

La microsegregación puede ocasionar **fragilidad en caliente**, o fusión del material interdendrítico con el punto de fusión más bajo a temperaturas por debajo de solidus en equilibrio. Cuando se calienta la aleación de Cu-40% Ni a 1225°C, por debajo de solidus en equilibrio pero por encima del solidus fuera de equilibrio, las regiones bajas en níquel entre las dendritas se funden.

Homogeneización Se pueden reducir la segregación interdendrítica y los problemas de fragilidad en caliente por medio de un **tratamiento térmico de homogeneización**. Si se calienta la pieza colada a una temperatura por debajo de solidus fuera de equilibrio, los átomos de níquel de los centros de las dendritas se difunden hacia las regiones interdendríticas; los átomos de cobre se difunden en la dirección opuesta [figura 10-17*a*)]. Dado que las distancias de difusión son relativamente cortas, sólo se requieren unas horas para eliminar la mayoría de las diferencias en la composición. El tiempo de homogeneización está relacionado con

$$t = \mathrm{c}\,\frac{(\mathrm{EBDS})^2}{D_s} \tag{10-6}$$

donde EBDS es el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios, D_s es la velocidad de difusión del soluto en la matriz y c es una constante. Un EBDS pequeño reduce la distancia de difusión y permite menores tiempos de homogeneización.

Macrosegregación Existe otro tipo de segregación, conocido como **macrosegregación**, la cual ocurre a una distancia mayor, entre la superficie y el centro de la pieza colada, con la superficie (la cual se solidifica primero) con un poco más de la cantidad promedio del metal con el punto de fusión más alto. La macrosegregación no se puede eliminar por medio de un tratamiento de homogeneización, debido a que las distancias de difusión son muy grandes. La macrosegregación puede reducirse por trabajo en caliente, tema que se explicó en el capítulo 8. Este fenómeno se debe a que, en el trabajo en caliente, básicamente se destruye la macroestructura de colada.

Polvos solidificados rápidamente En las aplicaciones en las que la porosidad, la microsegregación y la macrosegregación deben minimizarse, se preparan polvos de aleaciones complejas por medio de **atomización por rocío** [figura 10-17*b*)]. Durante este proceso se preparan fundidos homogéneos de composiciones complejas y se rocían a través de una boquilla cerámica. El flujo de la fusión se rompe en gotas más finas y se templa de manera rápida utilizando gases argón o nitrógeno (atomización con gas) o agua (atomización con agua). Las gotas fundidas, que se solidifican de manera rápida, generan partículas de polvo cuyo tamaño oscila entre ~10-100 μm. Dado que la solidificación de las gotas ocurre de manera muy rápida, hay muy poco tiempo para que se difundan, por lo que no ocurre segregación química. Muchas superaleaciones complejas basadas en níquel y cobalto y varios polvos de acero inoxidable son ejemplos de materiales preparados mediante esta técnica. Los polvos atomizados por rocío se mezclan y se moldean en las formas que se desean. Las técnicas que se emplean para procesar tales polvos incluyen la sinterización (capítulo 5), el **prensado en caliente** (PC) y el **prensado isostático en caliente** (PIC). En el PIC, la sinterización se conduce bajo una presión isostática (~ 173 MPa) utilizando, por ejemplo, gas argón. Pueden procesarse piezas muy grandes (de hasta ~ 600 mm, es decir, varios metros de largo) y pequeñas empleando el PIC. A partir de ellas pueden maquinarse componentes más pequeños como los discos que sujetan los álabes de las turbinas. En la figura 10-17*c*) se muestra la progresión de la densificación en una muestra de Astroalloy al bajo carbono procesada utilizando polvos atomizados por rocío.

El prensado en caliente es la sinterización bajo una presión uniaxial que se emplea para producir componentes más pequeños de materiales que son difíciles de sinterizar de otra manera

(capítulo 15). Las técnicas de PIC y de prensado en caliente se emplean para trabajar materiales en polvo metálicos y cerámicos.

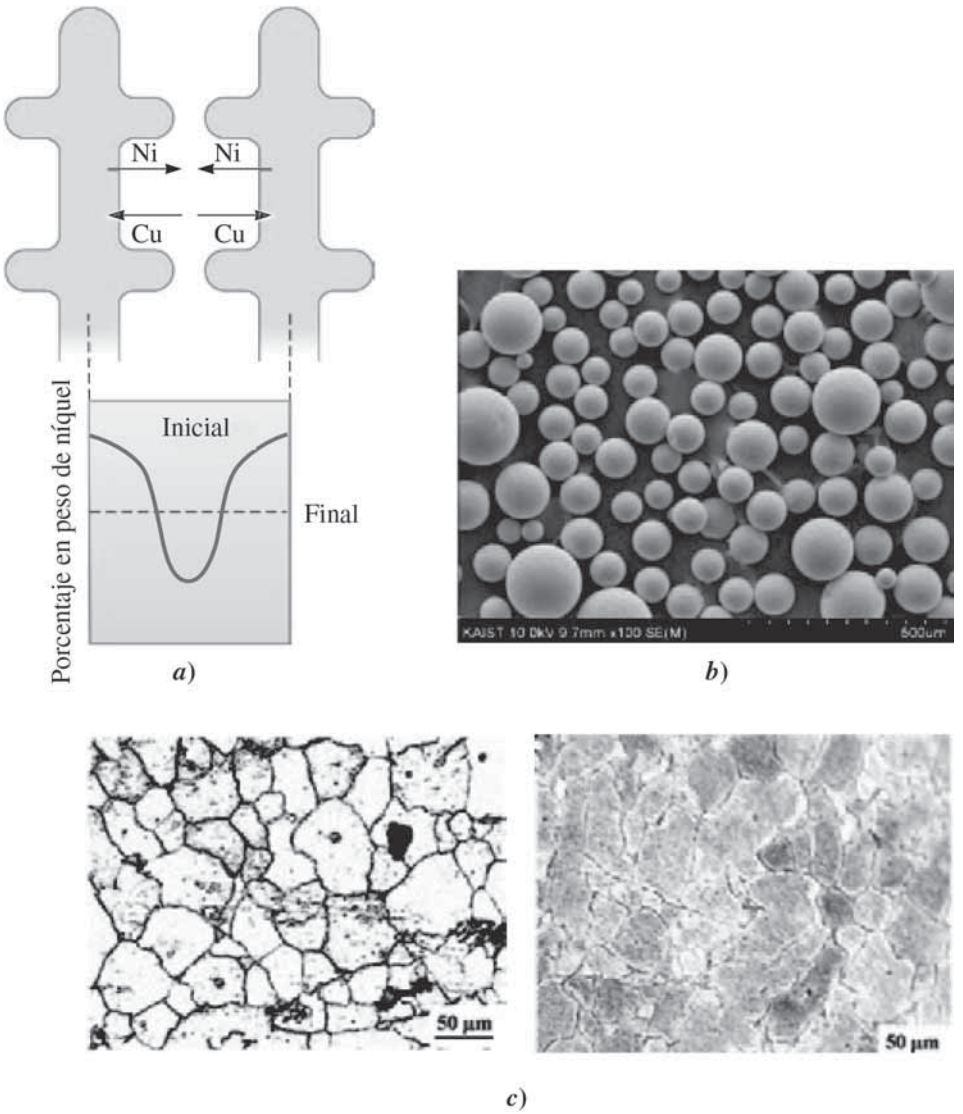


Figura 10-17 *a*) La microsegregación entre dendritas puede reducirse por medio de un tratamiento térmico de homogeneización. Con el tiempo, la contradifusión de los átomos de níquel y cobre puede eliminar los gradientes de composición y producir una composición homogénea. *b*) Polvos de superaleaciones atomizados por rocío. (*Reimpreso de Youngmoo Kim, Eun-Pyo Kim, Young-Beom Song, Sung Ho Lee, Young-Sam Kwon, "Microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed Ti–6Al–4V alloy," en* Journal of Alloys and Compounds*, vol. 603, pp. 207–212, derechos reservados 2014, con autorización de Elsevier.*) *c)* Micrografías de Al-4.5 %p Cu formadas por spray antes y después del PIC. Los poros son claramente visibles antes del PIC. La porosidad pasa de 8% antes del PIC a menos de 1% (*S. Devaraj, S. Sankaran, R. Kumar, G. Appa Rao, "Influence of Hot Isostatic Pressing on the Microstructure and Mechanical Properties", en* Journal of Materials Engineering and Performance*, abril de 2014, vol. 23, núm. 4, pp 1440–1450, © 2014, ASM International.*)

Resumen

- Una fase es cualquier parte, lo que incluye al todo, de un sistema cuyo interior es físicamente homogéneo y está delimitada por una superficie que la separa de cualquier otra parte.

- Por lo general, un diagrama de fases muestra las fases que se espera estén presentes en un sistema en condiciones de equilibrio termodinámico. En ocasiones también pueden mostrarse fases metaestables.
- Se forman soluciones sólidas en los materiales metálicos o cerámicos cuando elementos o compuestos con estructuras cristalinas similares forman una sola fase químicamente homogénea.
- El endurecimiento por solución sólida se lleva a cabo en los materiales metálicos por medio de la formación de soluciones sólidas. Los defectos de punto que se generan restringen el movimiento de las dislocaciones y provocan el endurecimiento.
- El grado de endurecimiento por solución sólida aumenta cuando 1) aumenta la cantidad del elemento de aleación y 2) aumenta la diferencia entre los tamaños atómicos del material anfitrión y del elemento de aleación.
- La cantidad del elemento (o compuesto) de aleación que puede agregarse para producir endurecimiento por solución sólida está limitada por la solubilidad del elemento o compuesto de aleación en el material anfitrión. La solubilidad es limitada cuando 1) la diferencia entre los tamaños atómicos es mayor de alrededor de 15%, 2) el elemento (o compuesto) de aleación tiene una estructura cristalina distinta de la del elemento (o compuesto) anfitrión y 3) la valencia y la electronegatividad del elemento o iones constituyentes de aleación son distintas de las del elemento (o compuesto) anfitrión.
- Además de incrementar la resistencia y la dureza, el endurecimiento por solución sólida por lo general disminuye la ductilidad y la conductividad eléctrica de los materiales metálicos. Una función importante del endurecimiento por solución sólida es proporcionar a la aleación buenas propiedades a temperaturas altas.
- Al diagrama de fases en el que los constituyentes exhiben una solubilidad sólida completa se le conoce como diagrama de fases isomorfo.
- Como resultado de la formación de soluciones sólidas, la solidificación comienza a la temperatura de liquidus y se completa a la temperatura de solidus; la diferencia entre las temperaturas en la cual ocurre la solidificación es el intervalo de solidificación.
- En las regiones de dos fases del diagrama de fases, los extremos de una línea de interconexión fijan la composición de cada fase y la regla de la palanca permite calcular la cantidad de cada fase.
- La microsegregación y macrosegregación se llevan a cabo durante la solidificación. La microsegregación, o segregación central, ocurre en distancias pequeñas, con frecuencia entre dendritas. Los centros de las dendritas son ricos en el elemento con el punto de fusión más alto, mientras que las regiones dendríticas, las cuales se solidifican en último término, son ricas en el elemento con el punto de fusión más bajo.
- La homogeneización puede reducir la microsegregación.
- La macrosegregación describe las diferencias entre las composiciones a grandes distancias, como las que existen entre la superficie y el centro de una pieza colada. El trabajo en caliente puede reducir la macrosegregación.

Glosario

Aleación Material conformado por múltiples elementos que exhibe propiedades de un material metálico.

Aleación de una sola fase Aleación que consiste en una fase.

Aleación multifase Aleación que consiste en dos o más fases.

Copolímero Polímero que se forma mediante la combinación de dos o más tipos de monómeros, por lo general con la idea de mezclar las propiedades inherentes de los polímeros individuales.

Diagramas de fases Diagramas que muestran las fases presentes en condiciones de equilibrio y las composiciones de las fases en cada combinación de temperatura y la composición general. En algunas ocasiones, los diagramas de fases también indican fases metaestables.

Diagrama de fases binario Diagrama de fases de un sistema con dos componentes.

Diagrama de fases de una sustancia pura Diagrama de fases en que sólo hay un componente.

Diagrama de fases isomorfo Diagrama de fases en el que los componentes muestran solubilidad sólida ilimitada.

Diagrama de P-T Diagrama que describe la estabilidad termodinámica de las fases en distintas condiciones de temperatura y presión (lo mismo que un diagrama de fases de una sustancia pura).

Endurecimiento por dispersión Endurecimiento, que por lo general se aplica a materiales metálicos, por medio de la formación de interfases entre las fases. Las interfases otorgan una resistencia adicional al movimiento de las dislocaciones, por lo que provoca el endurecimiento de los materiales metálicos (capítulo 11).

Endurecimiento por solución sólida Incremento de la resistencia de un material metálico por medio de la formación de una solución sólida.

Fase Cualquier parte, lo que incluye todo un sistema, que es físicamente homogénea en su interior y está delimitada por una superficie, por lo que está separada de cualquier otra parte.

Fragilidad en caliente Fundición del material fuera de equilibrio con el punto de fusión más bajo que se forma debido a la segregación, aun cuando la temperatura se encuentre por debajo de la temperatura de solidus en equilibrio.

Intervalo de solidificación Diferencia entre las temperaturas de liquidus y de solidus.

Línea de interconexión Línea horizontal que se traza en una región de dos fases de un diagrama de fases para asistir en la determinación de las composiciones de las dos fases.

Liquidus Curvas de los diagramas de fases que describen las temperaturas de liquidus de todas las aleaciones posibles.

Macrosegregación Presencia de diferencias entre las composiciones de un material a grandes distancias ocasionadas por la solidificación fuera de equilibrio. La única manera de eliminar este tipo de segregación es destruyendo la estructura colada por medio de trabajo en caliente.

Microsegregación Vea Segregación central.

Prensado en caliente (PC) Sinterización de polvos metálicos o cerámicos bajo una presión uniaxial; se emplea para producir componentes más pequeños de materiales que son difíciles de sinterizar de otra manera.

Prensado isostático en caliente (PIC) Sinterización de polvos cerámicos o metálicos que se lleva a cabo bajo una presión isostática.

Punto triple Presión y temperatura a las que están en equilibrio las tres fases de un material.

Regla de la palanca Técnica para determinar la cantidad de cada fase en un sistema de dos fases.

Regla de las fases Vea Regla de las fases de Gibbs.

Regla de las fases de Gibbs Describe el número de grados de libertad o el número de variables que deben fijarse para especificar la temperatura y la composición de una fase ($2 + C = F + P$, donde la presión y la temperatura pueden variar, $1 + C = F + P$, donde la presión o la temperatura son constantes).

Reglas de Hume-Rothery Condiciones que debe satisfacer un sistema de aleación o cerámico para tener solubilidad sólida ilimitada. Las reglas de Hume-Rothery son necesarias pero no suficientes para que los materiales muestren solubilidad sólida ilimitada.

Segregación Presencia de diferencias entre las composiciones de un material, con frecuencia ocasionadas por un tiempo insuficiente para la difusión durante la solidificación.

Segregación central Segregación química en productos colados, también conocida como microsegregación o segregación interdendrítica. Los centros de las dendritas son ricos en el elemento con el punto de fusión más alto, mientras que las regiones interdendríticas, que se solidifican en último término, son ricas en el elemento con el punto de fusión más bajo.

Segregación interdendrítica Vea Segregación central.

Solidus Curvas de los diagramas de fases que describen las temperaturas de solidus de todas las aleaciones posibles.

Solubilidad Cantidad de un material que se disolverá por completo en un segundo material sin crear una segunda fase.

Solubilidad ilimitada Fenómeno que se presenta cuando la cantidad de un material que se disolverá en un segundo material sin crear una segunda fase es ilimitada.

Solubilidad limitada Fenómeno que se presenta cuando sólo puede disolverse cierta cantidad de un material soluto en un material disolvente.

Solución sólida Fase sólida formada por la combinación de múltiples elementos o compuestos, de tal manera que la fase general tiene una composición uniforme y propiedades que son diferentes de las de los elementos o compuestos que la conforman.

Temperatura de liquidus Temperatura a la que comienza a formarse el primer sólido durante la solidificación.

Temperatura de solidus Temperatura por debajo de la cual todo el líquido se ha solidificado por completo.

Tratamiento térmico de homogeneización Tratamiento térmico que se emplea para reducir la microsegregación ocasionada durante la solidificación fuera de equilibrio. Este tratamiento térmico no puede eliminar la macrosegregación.

Problemas

10-1 Explique el principio del endurecimiento por tamaño de los granos. ¿Este mecanismo funciona a temperaturas altas? Explique las causas de ello.

10-2 Explique el principio de endurecimiento por deformación. ¿Este mecanismo funciona a temperaturas altas? Explique las causas de ello.

10-3 ¿Cuál es el principio del endurecimiento por solución sólida? ¿Este mecanismo funciona a temperaturas altas? Explique por qué.

10-4 ¿Cuál es el principio del endurecimiento por dispersión?

Sección 10-1 Fases y diagrama de fases

10-5 ¿A qué se refiere el término "fase"?

10-6 ¿Cuáles son las distintas fases del agua?

10-7 Se sabe que el hielo existe en distintos polimorfos. ¿Son éstos distintas fases del agua?

10-8 Escriba la regla de las fases de Gibbs, bajo el supuesto de que se permite que varíen la temperatura y la presión. Explique con claridad el significado de cada término.

10-9 ¿Qué es un diagrama de fases?

10-10 ¿Cuánto debe cambiar la temperatura para llevar al magnesio líquido de un equilibrio sólido-líquido a un equilibrio vapor-líquido a 1 atm? (Vea la figura 10-2)

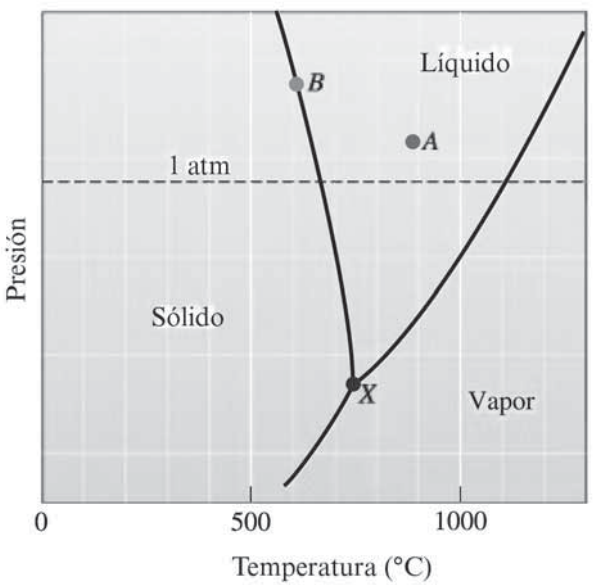


Figura 10-2 Diagrama de fases de una sustancia pura del magnesio, que muestra las temperaturas de fusión y ebullición a una atmósfera de presión. En este diagrama, el punto *X* es el punto triple. (Repetido para el problema 10-10.)

10-11 En la figura 10-18 se muestra el diagrama de fases de una sustancia pura del SiO_2. Localice el punto triple donde coexisten el sólido, el líquido y el vapor y determine la temperatura y el tipo de sólido presente. ¿Qué indican los demás puntos "triples"?

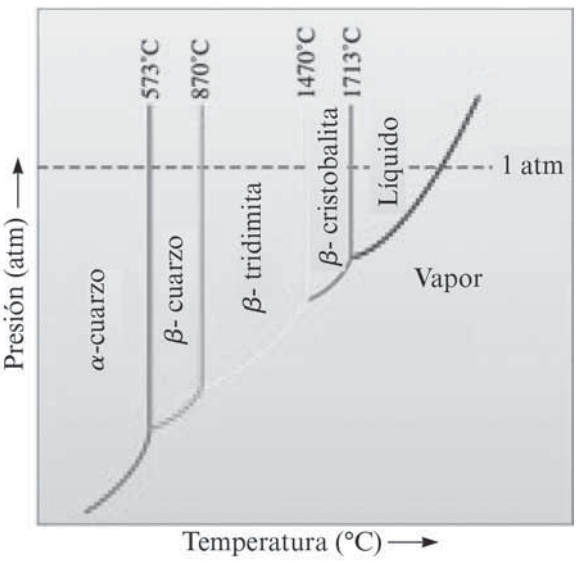


Figura 10-18 Diagrama de presión-temperatura del SiO_2. La línea discontinua muestra una atmósfera de presión. (Para el problema 10-11.)

10-12 La figura 10-19 muestra el diagrama de fases de una sustancia pura del carbono. Con base en este diagrama, ¿en qué condiciones puede convertirse en diamante el carbono que está en forma de grafito?

10-13 El diamante natural se forma a aproximadamente 120 a 200 km debajo de la superficie de la Tierra en condiciones de presión y temperaturas altas. Suponiendo que la densidad promedio de la Tierra es de 5500 kg/m^3, utilice esta información y el diagrama de fases de una sustancia pura de C (figura 10-19) para calcular el intervalo del gradiente geotérmico de la Tierra (rapidez a la que se incrementa la temperatura con la profundidad). Calcule la presión debajo de la superficie de la Tierra como ρgh, donde ρ es la densidad, g es la gravedad y h es la profundidad. Observe que 10 kbar = 10^9 Pa.

Sección 10-2 Solubilidad y soluciones sólidas

10-14 ¿Qué es una solución sólida?

10-15 ¿Cómo pueden formarse soluciones sólidas en los sistemas cerámicos?

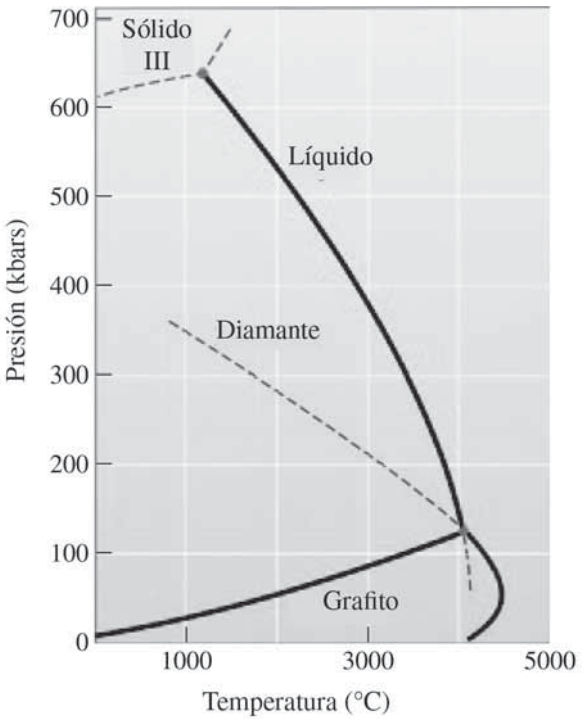


Figura 10-19 Diagrama de fases de una sustancia pura del carbono. La región para la formación del diamante se muestra con una línea discontinua. (*Basada en* Introduction to Phase Equilibria, *de C. G. Bergeron y S. H. Risbud, American Ceramic Society, 1984*.) (Para los problemas 10-12 y 10-13.)

10-16 ¿Se necesita una solubilidad sólida de 100% para formar una solución sólida de un material en otro?

10-17 Se agregan concentraciones pequeñas de zirconato de plomo ($PbZrO_3$) a titanato de plomo ($PbTiO_3$). Dibuje un esquema de la estructura cristalina de solución sólida resultante que se espera que se forme. Este material, conocido como titanato de zirconio y plomo (mejor conocido como PZT), tiene varias aplicaciones que van desde bujías hasta imágenes ultrasónicas. (Vea la sección 3-7 para conocer información sobre la estructura cristalina de la perovskita.)

10-18 ¿Pueden formarse soluciones sólidas entre tres elementos o tres compuestos?

10-19 ¿Qué es un copolímero? ¿Cuál es la ventaja de la formación de copolímeros?

10-20 ¿La formación de copolímeros es similar a la formación de soluciones sólidas?

10-21 ¿Qué es el copolímero ABS? Enuncie algunas de las aplicaciones de este material.

10-22 ¿Qué cantidad de zinc se requiere para una aleación de un bloque de cobre de 15 kg con zinc que se llevará al límite de solubilidad a 200°C? (Vea la figura 10-4.)

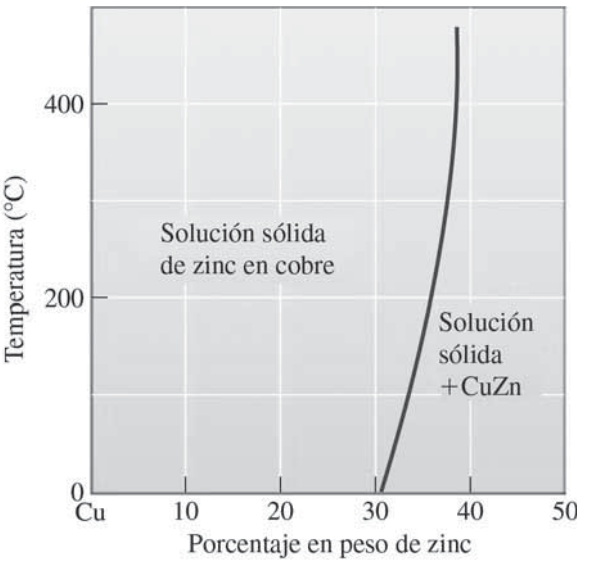


Figura 10-4 Solubilidad del zinc en cobre. La línea sólida representa el límite de solubilidad; cuando se adiciona zinc en exceso, se excede el límite de solubilidad y coexisten dos fases. (Repetido para los problemas 10-22 y 10-23.)

10-23 ¿Qué cantidad de zinc excede la solubilidad si se mezclan 115 kg de cobre y zinc (4 partes de Zn con 6 partes de Cu) a 400°C?

Sección 10-3 Condiciones de la solubilidad sólida ilimitada

10-24 Enuncie de manera breve las reglas de Hume-Rothery y explique su significado.

10-25 ¿Pueden aplicarse las reglas de Hume-Rothery a los sistemas cerámicos? Explique por qué.

10-26 ¿Cuál es la diferencia entre la solubilidad sólida limitada e ilimitada?

10-27 El cobre y el níquel tienen solubilidad ilimitada entre sí mientras que el plomo y el hierro son completamente insolubles. Utilice las reglas de Hume-Rothery para explicar estas condiciones. Presente su trabajo.

10-28 ¿Cuál de los siguientes elementos se debe esperar que muestren solubilidad sólida en oro? *a*) Ag; *b*) Al y *c*) Fe.

10-29 Con base en las condiciones de Hume-Rothery, ¿cuáles de los siguientes sistemas se debe esperar que muestren solubilidad sólida ilimitada? Explique por qué. *a*) Au-Ag; *b*) Al-Cu; *c*) Al-Au; *d*) U-W; *e*) Mo-Ta; *f*) Nb-W; *g*) Mg-Zn y *h*) Mg-Cd.

10-30 Identifique cuáles de los siguientes óxidos es probable que exhiban una solubilidad sólida del 100% cuando se adicionan al $BaTiO_3$: *a*) $SrTiO_3$; *b*) $CaTiO_3$; *c*) $ZnTiO_3$, y *d*) $BaZrO_3$. Todos estos óxidos poseen la estructura cristalina de la perovskita.

Sección 10-4 Endurecimiento por solución sólida

10-31 Suponga que se añade un %at de 1 de los siguientes elementos al cobre (para formar una aleación por separado con cada elemento) sin exceder el límite de solubilidad. ¿Cuál se debería esperar que produzca la aleación con mayor resistencia? ¿Se espera que algunos de los elementos de aleación tengan solubilidad sólida ilimitada en el cobre? *a*) Au; *b*) Mn; *c*) Sr; *d*) Si, y *e*) Co.

10-32 Suponga que se añade un %at de 1 de los siguiente elementos al aluminio (para formar una aleación por separado con cada elemento) sin exceder el límite de solubilidad. ¿Cuál se debería esperar que produzca la aleación de mayor resistencia? ¿Por qué? *a*) Mn; *b*) Mg; *c*) Cu y *d*) Zn.

10-33 Suponga que se añade un %at de 1 de los siguientes elementos al aluminio (para formar una aleación por separado con cada elemento) sin exceder el límite de solubilidad. ¿Cuál se debería esperar que provoque la menor reducción de la conductividad eléctrica? ¿Se puede esperar que algunos de los elementos de aleación tengan solubilidad sólida ilimitada en el aluminio? *a*) Li; *b*) Ba; *c*) Be; *d*) Cd, y *e*) Ga.

10-34 ¿Cuál de los siguientes óxidos se debe esperar que tenga la mayor solubilidad sólida en el Al_2O_3? *a*) Y_2O_3; *b*) Cr_2O_3, y *c*) Fe_2O_3.

10-35 ¿Cuál es la función de las concentraciones pequeñas de Mg en las aleaciones de aluminio que se utilizan para fabricar latas para bebidas?

10-36 ¿Por qué los joyeros agregan pequeñas cantidades de cobre al oro y a la plata?

10-37 ¿Por qué no es una buena idea emplear el endurecimiento por solución sólida como mecanismo para incrementar la resistencia del cobre en aplicaciones eléctricas?

Sección 10-5 Diagramas de fases isomorfos

10-38 ¿Qué es un diagrama de fases binario y qué información nos brinda? ¿Qué significa el término "diagrama de fases de equilibrio" con base en la termodinámica?

10-39 ¿Cuál es la relevancia de las curvas de liquidus y solidus?

10-40 ¿Qué es una aleación? ¿Cuál es la diferencia general entre los comportamientos de fusión de una aleación y el de un componente puro?

10-41 Determine los grados de libertad en las siguientes condiciones:

a) Tl-20 %p de Pb a 325°C y 400°C;
b) Tl-40 %p de Pb a 325°C y 400°C;
c) Tl-90 %p de Pb a 325°C y 400°C.

Remítase al diagrama de fases de la figura 10-8*d*).

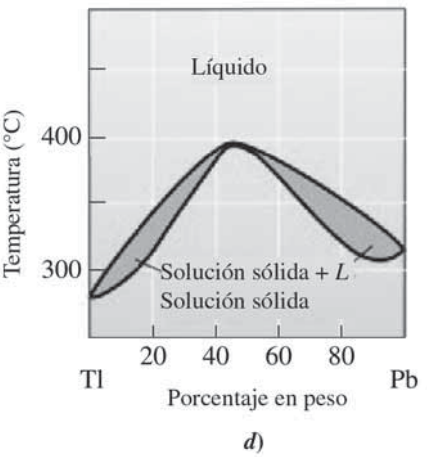


Figura 10-8 *d)* Sistemas con máximos y mínimos de solución sólida. (*Basada en* Introduction to Phase Equilibria, *de C. G. Bergeron y S. H. Risbud. American Ceramic Society, 1984*.)

10-42 Localice los siguientes puntos en el diagrama de fases de Bi-Sb e indique las fases presentes y sus cantidades relativas: *a*) 60 %at Bi a 250°C; *b*) 30 %at Bi a 500°C y *c*) 50 %at Bi a 600°C. (Vea la figura 10-20.)

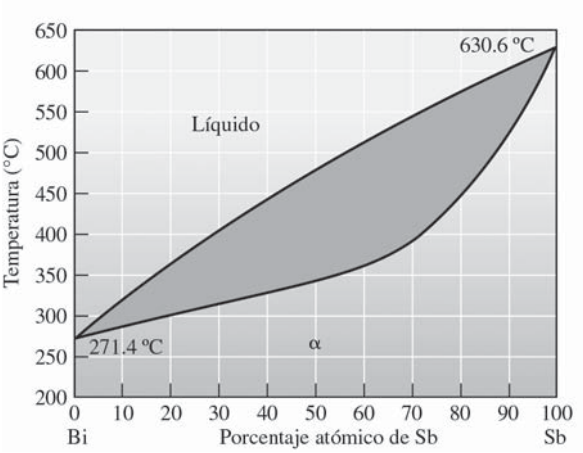


Figura 10-20 Diagrama de fases de Bi-Sb. (*Basado en Alberto Torres, Luis Hernández, Octavio Domínguez, "Effect of Antimony Additions on Corrosion and Mechanical Properties of Sn-Bi Eutectic Lead-Free Solder Alloy", en* Materials Sciences and Applications, *vol.3 núm. 6 (2012), http://file.scirp.org/Html/3-7700734_19815.htm*) (Para los problemas 10-42 y 10-68.)

10-43 Determine el intervalo de composiciones en el que la aleación de Tl-Pb a 350°C es *a*) líquida por completo; *b*) sólida por completo, y *c*) parcialmente líquida y parcialmente sólida.

Remítase a la figura 10-8*d*) para el diagrama de fases de Tl-Pb. Además, determine la cantidad de solución líquida y sólida de Tl-25 %p de Pb y Tl-75 %p a 350°C, y también el %p de Pb en la solución líquida y sólida de ambas composiciones de la aleación.

10-44 Determine la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación de las siguientes composiciones cerámicas de NiO-MgO: *a*) NiO-30 %mol de MgO; *b*) NiO-45 %mol de MgO; *c*) NiO-60 %mol de MgO, y *d*) NiO-85 %mol de MgO. [Vea la figura 10-8*b*).]

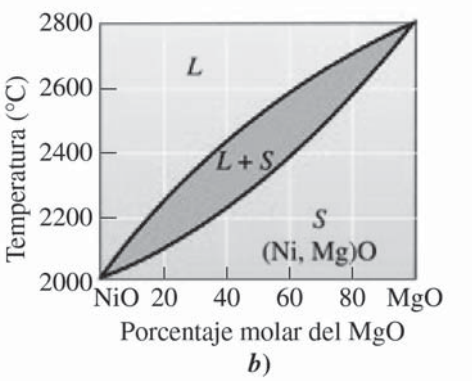


Figura 10-8*b)* Diagrama de fases de equilibrio del sistema NiO-MgO. (Repetida para los problemas 10-44, 10-50, 10-53, 10-57 y 10-71.)

10-45 Determine la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación de las siguientes composiciones cerámicas de $Al_2O_3Cr_2O_3$: *a*) Al_2O_3-30 %p de Cr_2O_3; *b*) Al_2O_3-50 %p de Cr_2O_3 y *c*) Al_2O_3-75 %p de Cr_2O_3. (Vea la figura 10-9.)

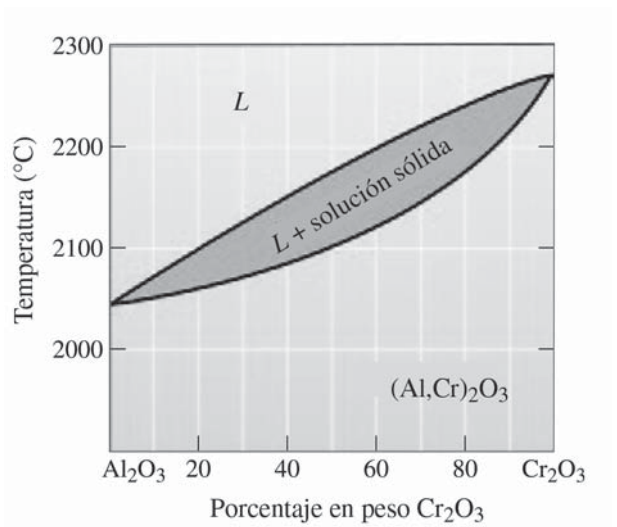


Figura 10-9 Diagrama de fases de Al_2O_3-Cr_2O_3 (Repetida para los problemas 10-45 y 10-46.)

10-46 Determine las fases presentes, la composición de cada fase y la cantidad en %p en cada fase de las siguientes cerámicas $Al_2O_3Cr_2O_3$ a 2150°C: *a*) Al_2O_3-30 %p de Cr_2O_3; *b*) Al_2O_3-50 %p de Cr_2O_3; *c*) Al_2O_3-75 %p de Cr_2O_3. (Vea la figura 10-9.)

10-47 Determine *a*) la temperatura de liquidus; *b*) la temperatura de solidus y *c*) el intervalo de solidificación de una aleación de Ag 60 %p de Pd. (Vea la figura 10-21.)

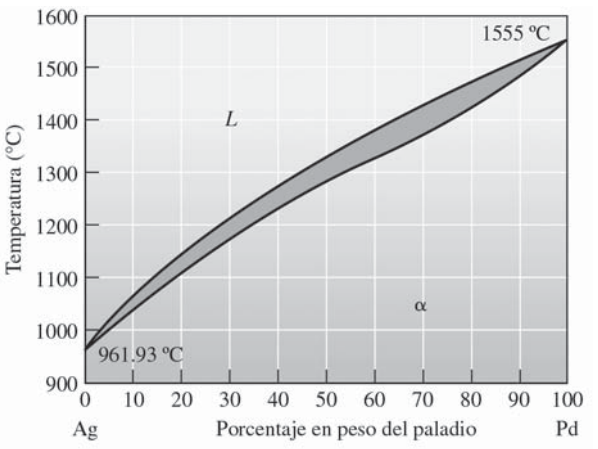


Figura 10-21 Diagrama de fases de Ag-Pd para los problemas 10-47 y 10-48. (*Basado en Karakaya y Thompson*, Bulletin of Alloy Phase Diagrams, *junio de 1988, vol. 9, núm. 3, pp. 237–243, Springer.*) (Para los problemas 10-47 y 10-48.)

10-48 Localice los siguientes puntos en el diagrama de fases de Ag-Pd e indique las fases presentes y sus cantidades relativas: *a*) 50 %p de Pd a 1300 °C; *b*) 80 %p de Pd a 1425°C y *c*) 90 %p de Ag a 1100°C. (Vea la figura 10-21.)

10-49 Determine la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación de las siguientes composiciones cerámicas de MgO-FeO: *a*) MgO-25 %p de FeO; *b*) MgO-45 %p de FeO; *c*) MgO-65 %p de FeO, y *d*) MgO-80 %p de FeO. (Vea la figura 10-22.)

10-50 Determine las fases presentes, las composiciones de cada fase y la cantidad de cada fase en %mol para las siguientes cerámicas de NiO-MgO a 2400°C: *a*) NiO-30 %mol de MgO; *b*) NiO-45 %mol de MgO; *c*) NiO-60 %mol de MgO, y *d*) NiO-85 %mol de MgO. [Vea la figura 10-8*b*).]

10-51 Determine las fases presentes, las composiciones de cada fase y la cantidad de cada fase en %p de las siguientes cerámicas de MgO-FeO a 2000°C: *a*) MgO-25 %p de FeO; *b*) MgO-45 %p

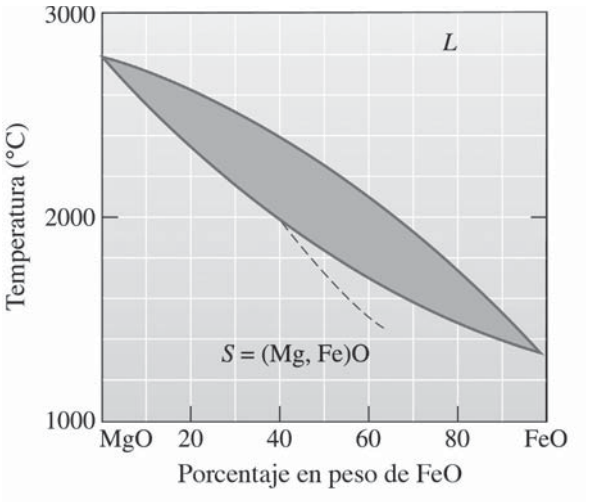


Figura 10-22 Diagrama de fases de equilibrio del sistema de MgO-FeO. La curva discontinua muestra el solidus fuera de equilibrio. (Para los problemas 10-49, 10-51, 10-59, 10-60, 10-69, 10-73 y 10-79.)

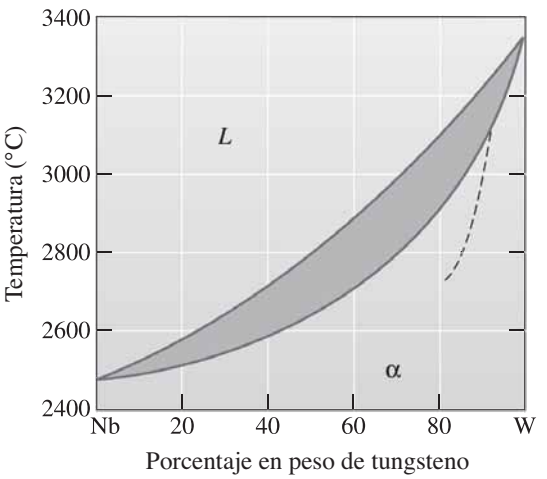


Figura 10-23 Diagrama de fases de equilibrio del sistema de Nb-W. La curva discontinua representa el solidus fuera de equilibrio. (Repetida para los problemas 10-54, 10-61, 10-62, 10-63, 10-64, 10-70, 10-72, 10-75 y 10-80.)

de FeO; *c*) MgO-60 %p de FeO, y *d*) MgO-80 %p de FeO. (Vea la figura 10-22.)

10-52 Considere una cerámica compuesta de 30 %mol de MgO y un 70 %mol de FeO. Calcule la composición de la cerámica en %p.

10-53 Se calienta a 2200°C una cerámica de NiO-20 %mol de MgO. Determine *a*) la composición de las fases sólida y líquida en %mol y %p; *b*) la cantidad de cada fase en %mol y %p, y *c*) suponiendo que la densidad del sólido es de 6,320 kg/m^3 y que la del líquido es de 7,140 kg/m^3, determine la cantidad de cada fase en %vol. [Vea la figura 10-8*b*).]

10-54 Se calienta a 2800°C una aleación de Nb-60 %p de W. Determine *a*) la composición de las fases sólida y líquida en %p y %at; *b*) la cantidad de cada fase en %p y %at, y *c*) suponiendo que la densidad del sólido es de 16,050 kg/m^3 y que la del líquido es de 13,910 kg/m^3, determine la cantidad de cada fase en %vol. (Vea la figura 10-23.)

10-55 ¿Cuántos gramos de níquel deben adicionarse a 500 gramos de cobre para producir una aleación que tenga una temperatura de liquidus de 1350°C? ¿Cuál es la razón del número de átomos de níquel a átomos de cobre en esta aleación? [Vea la figura 10-8*a*).]

10-56 ¿Cuántos gramos de níquel deben agregarse a 500 gramos de cobre para producir una aleación que contenga un 50 %p de α a 1300°C? [Vea la figura 10-8*a*).]

10-57 ¿Cuántos gramos de MgO deben agregarse a 1 kg de NiO para producir una cerámica que tenga una temperatura de solidus de 2200°C? [Vea la figura 10-8*b*).]

10-58 ¿Cuántos gramos de MgO deben agregarse a 1 kg de NiO para producir una cerámica que contenga un 25 %mol del sólido a 2400°C? [Vea la figura 10-8*b*).]

10-59 Se desea producir una cerámica sólida de MgO-FeO que contenga porcentajes molares iguales de MgO y FeO a 1200°C. Determine el %p de FeO en la cerámica. (Vea la figura 10-22.)

10-60 Se desea producir una cerámica de MgO-FeO con %p de 30 del sólido a 2000°C. Determine la composición de la cerámica en %p. (Vea la figura 10-22.)

10-61 Una aleación de Nb-W que se mantiene a 2800°C es parcialmente líquida y parcialmente sólida. *a*) Si es posible, determine la composición de cada fase en la aleación, y *b*) si es posible, determine la cantidad de cada fase en la aleación. (Vea la figura 10-23.)

10-62 Una aleación de Nb-W contiene 55 % α a 2600°C. Determine *a*) la composición de cada fase y *b*) la composición de la aleación. (Vea la figura 10-23.)

10-63 Suponga que un baño con 1200 lb de una aleación de Nb-40 %p de W se mantiene a 2800°C. ¿Cuántas libras de tungsteno pueden adicionarse al baño antes de que se forme algún sólido? ¿Cuántas libras de tungsteno deben agregarse para ocasionar que todo el baño sea sólido? (Vea la figura 10-23.)

10-64 Se produce un material compuesto reforzado con fibras, en el que fibras de tungsteno están

insertadas en una matriz de Nb. El compuesto está conformado por un 70 %vol de tungsteno. *a*) Calcule el %p de fibras de tungsteno en el compuesto y *b*) suponga que el compuesto se calienta a 2600°C y se mantiene así por varios años. ¿Qué le sucede a las fibras? Explique por qué. (Vea la figura 10-23.)

10-65 Suponga que se utiliza un crisol hecho de níquel puro para contener 500 g de cobre líquido a 1150°C. Describa qué le sucede al sistema a medida que se mantiene a esta temperatura por varias horas. Explique por qué. [Vea la figura 10-8*a*).]

Sección 10-6 Relación entre las propiedades y el diagrama de fases

10-66 ¿Qué es el latón? Explique qué elemento endurece la matriz en esta aleación.

10-67 ¿Cuál es la composición de la aleación Monel?

Sección 10-7 Solidificación de una aleación de solución sólida

10-68 Una aleación de Bi 60 %p de Sb se enfría en condiciones de equilibrio en estado líquido. Determine *a*) la temperatura en la que se forma el primer núcleo sólido y su composición; *b*) la composición y cantidades relativas de las fases a 450°C, y *c*) la temperatura en la que el último líquido está presente y su composición. (Vea la figura 10-20.)

10-69 Se combinan y se funden moles iguales de MgO y FeO. Determine *a*) la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación de la cerámica, y *b*) determine la(s) fase(s) presente(s), su(s) composición(es) y su(s) cantidad(es) a 1,800°C. (Vea la figura 10-22.)

10-70 Suponga que se combinan y se fusionan 75 cm^3 de Nb y 45 cm^3 de W. Determine *a*) la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus y el intervalo de solidificación de la aleación y *b*) determine la(s) fase(s) presente(s), su(s) composición(es) y su(s) cantidad(es) a 2800°C. (Vea la figura 10-23.)

10-71 Se permite que se solidifique una cerámica de NiO-60 %mol de MgO. Determine *a*) la composición del primer sólido que se formará y *b*) la composición del último líquido que se solidificará en condiciones de equilibrio. [Vea la figura 10-8*b*).]

10-72 Se permite que se solidifique una aleación de Nb-35 % de W. Determine *a*) la composición del primer sólido que se formará y *b*) la composición del último líquido que se solidificará en condiciones de equilibrio. (Vea la figura 10-23.)

10-73 En condiciones de equilibrio y una cerámica de MgO-65 %p de FeO, determine *a*) la temperatura de liquidus; *b*) la temperatura de solidus; *c*) el intervalo de solidificación; *d*) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación; *e*) la composición del último líquido que se solidificará; *f*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1800°C, y *g*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1600°C. (Vea la figura 10-22.)

10-74 La figura 10-24 muestra la curva de enfriamiento de una cerámica de NiO-MgO. Determine *a*) la temperatura de liquidus; *b*) la temperatura de solidus; *c*) el intervalo de solidificación; *d*) la temperatura del vertido; *e*) el sobrecalor; *f*) el tiempo de solidificación local; *g*) el tiempo de solidificación total, y *h*) la composición de la cerámica.

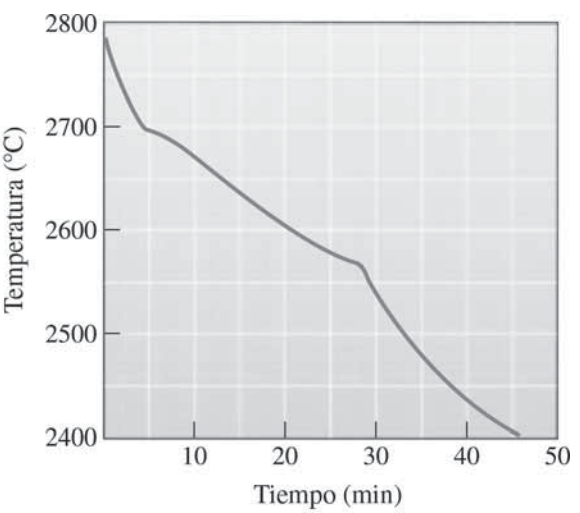


Figura 10-24 Curva de enfriamiento de la cerámica NiO-MgO. (Para el problema 10-74.)

10-75 En condiciones de equilibrio y una aleación de Nb-80 %p de W, determine *a*) la temperatura de liquidus; *b*) la temperatura de solidus; *c*) el intervalo de solidificación; *d*) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación; *e*) la composición del último líquido que se solidificará; *f*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 3000°C, y *g*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 2800°C. (Vea la figura 10-23.)

10-76 La figura 10-25 muestra la curva de enfriamiento de una aleación de Nb-W. Determine *a*) la temperatura de liquidus; *b*) la temperatura de solidus; *c*) el intervalo de solidificación; *d*) la

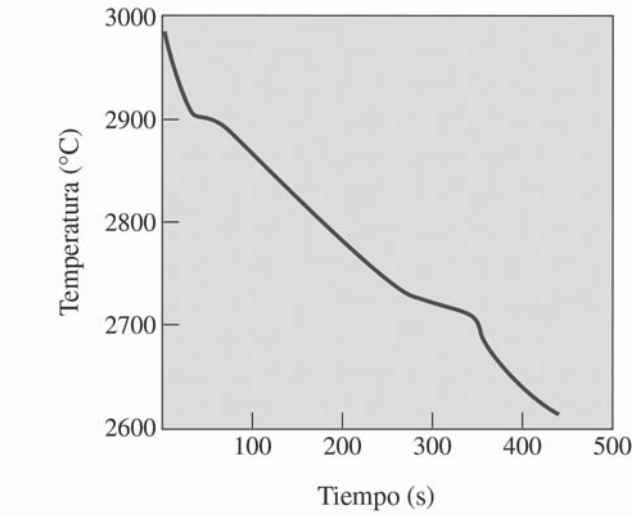


Figura 10-25 Curva de enfriamiento de la aleación Nb-W. (Para el problema 10-76.)

temperatura del vertido; *e*) el sobrecalor; *f*) el tiempo de solidificación local; *g*) el tiempo de solidificación total, y *h*) la composición de la aleación.

10-77 En la figura 10-26 se muestran las curvas de enfriamiento de varias aleaciones de Mo-V. Con base en estas curvas, trace el diagrama de fases de Mo-V.

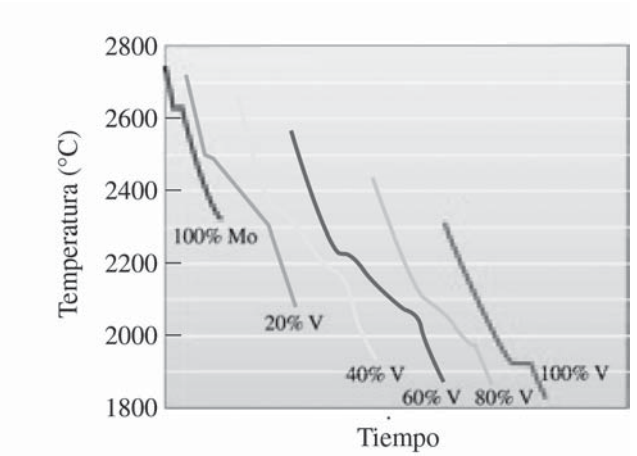


Figura 10-26 Curvas de enfriamiento de una serie de aleaciones de Mo-V (Problema 10-77.)

Sección 10-8 Solidificación y segregación fuera de equilibrio

10-78 ¿Cuáles son las causas de la segregación química en los productos colados?

10-79 En las condiciones fuera de equilibrio que se muestran de la cerámica de MgO-65 %p de FeO, determine *a*) la temperatura de liquidus; *b*) la temperatura de solidus fuera de equilibrio; *c*) el intervalo de solidificación; *d*) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación; *e*) la composición del último líquido que se solidificará; *f*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1800°C, y *g*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 1600°C. (Vea la figura 10-22.)

10-80 En las condiciones fuera de equilibrio que se muestran de la aleación de Nb-80 %p de W, determine *a*) la temperatura de liquidus; *b*) la temperatura de solidus fuera de equilibrio; *c*) el intervalo de solidificación; *d*) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación; *e*) la composición del último líquido que se solidificará; *f*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 3000°C, y *g*) la(s) fase(s) presente(s), la(s) composición(es) de la(s) fase(s) y la cantidad de la(s) fase(s) a 2800°C. (Vea la figura 10-23.)

10-81 ¿Cómo puede eliminarse la microsegregación?

10-82 ¿Qué es la macrosegregación? ¿Existe alguna manera de eliminarla sin destruir la estructura colada?

10-83 ¿Qué es la homogeneización? ¿Qué tipo de segregación puede eliminar?

10-84 Una aleación de cobre-níquel que se solidifica con un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS) de 10 μm requiere 15 horas de un tratamiento térmico de homogeneización a 1100°C. ¿Cuál es el tiempo de homogeneización que requiere para la misma aleación con un EBDS de 100 μm y de 1 μm? Si el coeficiente de difusión del Ni en Cu a 1100°C es de 3×10^{-14} m^2/s, calcule la constante c de la ecuación del tiempo de homogeneización. ¿Qué suposición se realiza en este cálculo?

10-85 ¿Qué es la atomización por rocío? ¿Puede emplearse para fabricar polvos cerámicos?

10-86 Suponga que se le pide que fabrique un componente crítico con base en una superaleación basada en níquel. El componente no debe contener ninguna porosidad y debe ser químicamente homogéneo. ¿Qué proceso de fabricación emplearía para esta aplicación? ¿Por qué?

10-87 ¿Qué es el prensado en caliente? ¿En qué difiere del prensado isostático en caliente?

Problemas de diseño

10-88 La homogeneización de una aleación de Cu-Ni enfriada de manera lenta que tiene un espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios

(EBDS) de 250 μm requiere 8 horas a 1000°C. Diseñe un proceso para producir una estructura homogénea en una aleación de Cu-Ni enfriada de manera más rápida que tenga un EBDS de 50 μm.

10-89 Diseñe un proceso para producir un refractario de NiO-60 % MgO con una estructura que sea 40% de una fase vítrea a temperatura ambiente. Incluya todas las temperaturas relevantes.

10-90 Diseñe un método por medio del cual puedan mezclarse y distribuirse de manera uniforme perlas de vidrio (que tienen una densidad de 2300 kg/m^3) en una aleación de Cu-20 % Ni (con una densidad de 8910 kg/m^3).

10-91 Suponga que el MgO contiene 5% mol de NiO. Diseñe un método de purificación de la solidificación que reduzca el NiO a menos de 1 % mol en el MgO.

Problemas por computadora

10-92 *Regla de las fases de Gibbs*. Edite un programa de cómputo que calcule de manera automática la regla de las fases de Gibbs. El programa debe pedirle al usuario información sobre si la presión y la temperatura o sólo la presión se mantienen constantes. Además, debe emplear la ecuación correcta para calcular la variable apropiada que el usuario desea conocer. El usuario proporcionará entradas para el número de componentes. Después, si el usuario desea proporcionar el número de fases presentes, el programa debe calcular los grados de libertad y viceversa.

10-93 *Conversión de %p en %at en un sistema binario*. Edite un programa de cómputo que permitirá la conversión de %p en %at. El programa debe pedirle al usuario que proporcione los pesos formulares apropiados de los elementos/compuestos. (Vea las ecuaciones 10-4 y 10-5.)

10-94 *Reglas de Hume-Rothery.* Edite un programa de cómputo que pronostique si es probable o no una solubilidad sólida de 100% entre dos elementos. El programa debe pedirle al usuario que proporciones información sobre las estructuras cristalinas de los elementos o compuestos, los radios de los distintos átomos o iones involucrados y los valores de la valencia y la electronegatividad. Tendrá que realizar suposiciones como qué tanta diferencia entre los valores podría ser aceptable. El programa debe emplear las reglas de Hume-Rothery y darle al usuario una guía sobre la posibilidad de formación de un sistema que permita una solubilidad sólida de 100%.

Problemas Knovel[MR]

K10-1 ¿Cuál es la temperatura de solidus de un sistema de silicio-germanio que contiene 30 %p de Si?

La soldadura blanda desempeña una función clave en el procesamiento de circuitos impresos y otros dispositivos relacionado con la microelectrónica. Con frecuencia, este proceso usa aleaciones a base de plomo y estaño. Las composiciones específicas de estas aleaciones, conocidas como composiciones eutécticas, se funden a una temperatura constante (como los elementos puros). Estos compuestos también son mecánicamente resistentes dado que su microestructura consiste en una mezcla profunda de dos fases distintas. La mejora de las propiedades mecánicas debido a la dispersión de una fase en otra por medio de la formación de eutécticos es el tema central de este capítulo. (*Photolink/Photodisc Green/ Getty Images*)

CAPÍTULO

11

Endurecimiento por dispersión y diagramas de fases eutécticas

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Cuáles son las aleaciones que se usan con más frecuencia en la soldadura blanda?*
- *· ¿Qué es una fibra de vidrio?*
- *· ¿Si existe una aleación que se solidifique a temperatura constante?*
- *· ¿Qué es el vidrio Pyrex®?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Explicar los efectos del endurecimiento por dispersión sobre las propiedades mecánicas de los materiales metálicos.
- Dibujar un diagrama de fases eutécticas que indique la temperatura de fusión de cada elemento puro, la temperatura eutéctica y las fases que se desarrollan en cada región.
- Calcular la cantidad y composición de cada fase en cualquier punto de un diagrama de fases eutécticas.
- Esbozar la microestructura probable de un sistema eutéctico, dadas su composición e historia de tratamiento de enfriamiento.
- Determinar la composición de una aleación con base en su curva de enfriamiento.
- Describir los mecanismos vapor-líquido-sólido (VLS) del crecimiento de nanoalambres.

Cuando se excede la solubilidad de un material porque se ha agregado demasiado de un elemento o compuesto de aleación, se forma una segunda fase y se produce un material con dos fases. El límite entre las dos fases, conocido como **interfaz de interfases**, es una superficie donde el arreglo atómico no es perfecto. En el caso de los materiales metálicos, este límite interfiere con el deslizamiento o movimiento de las dislocaciones, lo cual provoca su endurecimiento. El término general para designar tal endurecimiento debido a la introducción de una segunda fase se conoce como endurecimiento por dispersión.

En este capítulo, primero se explican los fundamentos del endurecimiento por dispersión para determinar la microestructura que se desea producir. Después se estudian los tipos de reacciones que producen aleaciones con múltiples fases. Por último, se examinan los métodos para lograr el endurecimiento por dispersión a través del control del proceso de solidificación. En este contexto, se examinarán los diagramas de fases que involucran la formación de múltiples fases. El enfoque se concentrará en los diagramas de fases eutécticas.

Se concluirá este capítulo con el estudio del método de vapor-líquido-sólido del crecimiento de nanoalambres, el cual puede comprenderse considerando los diagramas de fases eutécticas.

11-1 Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión

La mayoría de los materiales de ingeniería están compuestos por más de una fase y muchos de ellos se diseñan para que alcancen un cierto nivel de resistencia. En las aleaciones simples **endurecidas por dispersión** se introducen partículas pequeñas de una fase, por lo general muy resistentes y duras, en una segunda fase, la cual es más débil pero más dúctil. A la fase blanda, por lo general continua y presente en cantidades mayores, se le llama **matriz**. A la fase de endurecimiento duro puede llamársele **fase dispersa** o **precipitado**, con base en la manera en que se forma la aleación. En algunos casos, una fase o una mezcla de fases pueden tener una apariencia muy característica, en cuyo caso a esta fase o mezcla de fases puede llamársele **microconstituyente**. Para que ocurra el endurecimiento por dispersión, la fase dispersa o precipitado debe ser lo suficientemente pequeña como para conformar obstáculos eficaces al movimiento de las dislocaciones, es decir, generar el mecanismo de endurecimiento.

En la mayoría de las aleaciones, el endurecimiento por dispersión se produce por medio de transformaciones de fase. En este capítulo se explicará la transformación de solidificación por medio de la cual se solidifica un líquido para formar de manera simultánea dos fases sólidas. A este proceso se le llama reacción **eutéctica,** y es de particular importancia en los casos de los hierros colados y muchas aleaciones de aluminio. En el siguiente capítulo se explicará la reacción **eutectoide**, por medio de la cual una fase sólida reacciona para formar de manera simultánea dos fases sólidas distintas; esta reacción es clave para controlar las propiedades en los aceros. También en el capítulo 12 se explicará el **endurecimiento por precipitación** (o **por envejecimiento**), el cual produce precipitados por medio de un tratamiento térmico sofisticado.

Cuando el incremento de la resistencia y la tenacidad son los objetivos de la incorporación de una fase dispersa, debe seguirse esta guía (figura 11-1).

1. La matriz debe ser blanda y dúctil, mientras que la fase dispersa debe ser dura y resistente. Las partículas de la fase dispersa interfieren con el deslizamiento, mientras que la matriz proporciona, al menos, algo de ductilidad a la aleación general.
2. La fase dispersa dura debe ser discontinua, mientras que la matriz blanda y dúctil tiene que ser continua. Si la fase dispersa, dura y frágil fuese continua, las grietas podrían propagarse a lo largo de toda la estructura.
3. Las partículas de la fase dispersa deben ser pequeñas y numerosas, lo cual incrementa la probabilidad de que interfieran con el proceso de deslizamiento, dado que el área de la interfaz de interfases aumenta de forma significativa.
4. Las partículas de la fase dispersa deben ser redondas, en vez de tener forma de aguja o borde afilado, dado que la forma redonda es menos probable que permita que se inicie una grieta o actúe como una muesca.
5. Las concentraciones más altas de la fase dispersa incrementan la resistencia de la aleación.

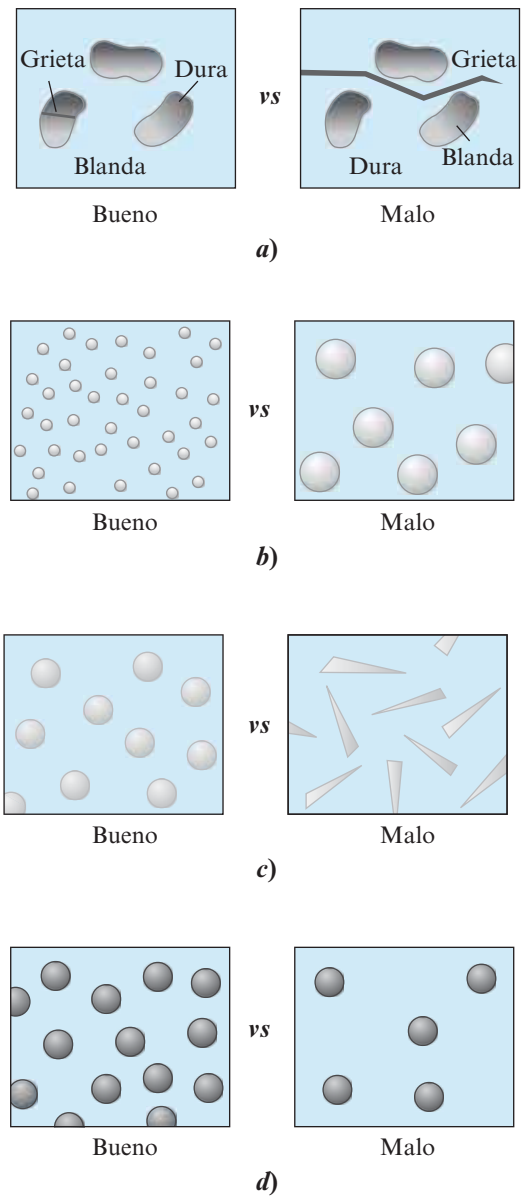


Figura 11-1 Consideraciones sobre un endurecimiento por dispersión efectivo: *a*) La fase precipitada debe ser dura y discontinua, mientras que la matriz debe ser continua y blanda, *b*) las partículas de la fase dispersa deben ser pequeñas y numerosas, *c*) las partículas de la fase dispersa deben ser redondas en vez de tener forma de aguja y *d*) cantidades mayores de la fase dispersa incrementan el endurecimiento.

11-2 Compuestos intermetálicos

Un **compuesto intermetálico** contiene dos o más elementos metálicos y produce una nueva fase con composición, estructura cristalina y propiedades propias. Los compuestos intermetálicos casi siempre son muy duros y frágiles. Además, son similares a los materiales cerámicos en términos de sus propiedades mecánicas.

El interés que recae en los intermetálicos tiene un doble origen. Primero, con frecuencia las aleaciones endurecidas por dispersión contienen un compuesto intermetálico como la fase dispersa. Segundo, muchos compuestos intermetálicos, por sí mismos (y no como una segunda fase), se están investigando y desarrollando para aplicaciones a altas temperaturas. En esta sección se explicarán las propiedades de los intermetálicos como materiales independientes. Más adelante se mostrará la forma en que las fases intermetálicas ayudan a endurecer materiales metálicos. La tabla 11-1 resume las propiedades de algunos compuestos intermetálicos.

Tabla 11-1 Propiedades de algunos compuestos intermetálicos

Compuestos intermetálicos	Estructura cristalina	Temperatura de fusión (°C)	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Módulo de Young (GPa)
FeAl	CCCu ordenada	1250–1400	5600	263
NiAl	CCCa ordenada (*B2)	1640	5900	206
Ni_3Al	CCCa ordenada (*$L1_2$)	1390	7500	337
TiAl	CCCa ordenada (*$L1_0$)	1460	3800	94
Ti_3Al	CH ordenada	1600	4200	210
$MoSi_2$	Tetragonal	2020	6310	430

* *Basada en Meyers, M. A. y Chawla, K. K.,* Mechanical Behavior of Materials, *2a. ed., Cambridge University Press, 2009.*

Los **compuestos intermetálicos estequiométricos** tienen una composición fija. Con frecuencia, los aceros se endurecen por medio de un compuesto estequiométrico, carburo de hierro (Fe_3C), el cual tiene una razón fija de tres átomos de hierro a un átomo de carbono. Observe que el Fe_3C no cumple de manera estricta con la definición de un compuesto intermetálico, ya que no contiene dos o más elementos metálicos; sin embargo, se lo incluye con frecuencia en esta categoría. Los compuestos intermetálicos estequiométricos se representan en el diagrama de fases por medio de una línea vertical [figura 11-2*a*)]. Un ejemplo de un compuesto intermetálico útil es el disiliciuro de molibdeno ($MoSi_2$), material que se usa para fabricar elementos de calefacción para hornos que operan a altas temperaturas. A este nivel (~1,000 a 1,600°C), el $MoSi_2$ muestra una resistencia sorprendente a la oxidación. A temperaturas bajas (~500°C y menores), el $MoSi_2$ es frágil y muestra una oxidación catastrófica conocida como plaga.

A los **compuestos intermetálicos no estequiométricos,** que tienen un intervalo de composiciones, en algunas ocasiones se les llaman **soluciones sólidas intermedias**. En el sistema molibdeno-rodio, la fase γ es un compuesto intermetálico no estequiométrico [figura 11-2 *b*)]. Debido a que la razón de los átomos de molibdeno-rodio no es fija, esta fase puede contener un %pe de 45 a 83 Rh a 1,600°C. La precipitación de aluminuro de cobre intermetálico no estequiométrico ($CuAl_2$) provoca el endurecimiento en varias de las más importantes aleaciones de aluminio.

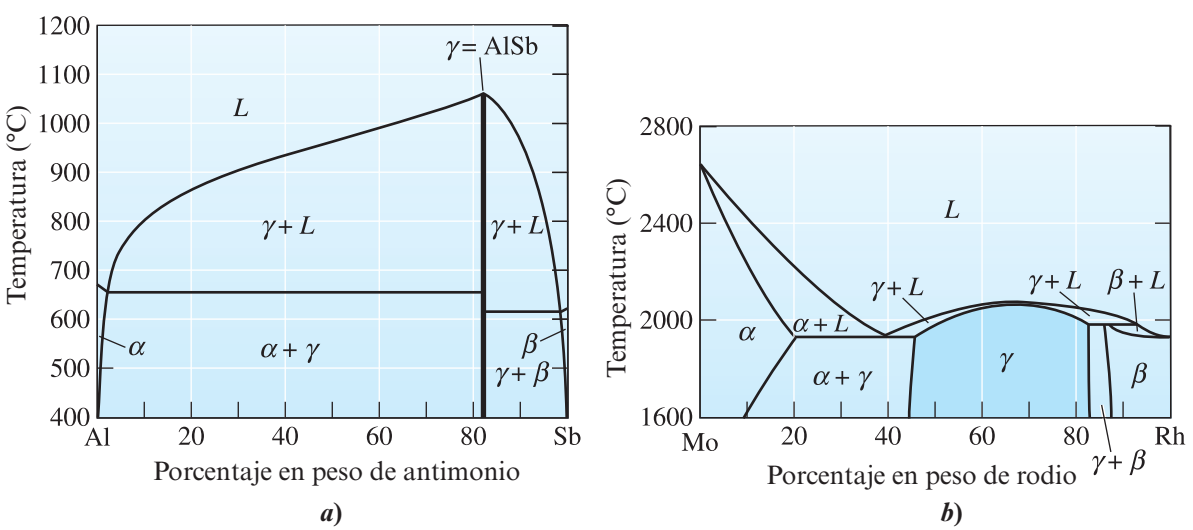


Figura 11-2 *a*) El diagrama de fases de aluminio-antimonio incluye un compuesto intermetálico estequiométrico γ. *b*) El diagrama de fases de molibdeno-rodio incluye un compuesto intermetálico no estequiométrico γ.

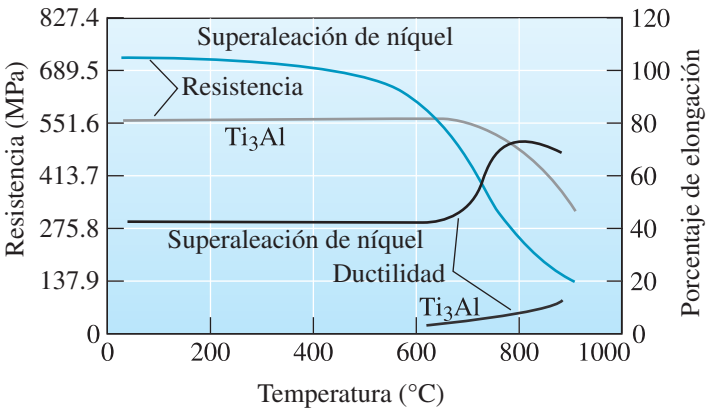


Figura 11-3 Resistencia y ductilidad del compuesto intermetálico Ti_3Al en comparación con las de una superaleación convencional de níquel. El Ti_3Al mantiene su resistencia a temperaturas más altas que la superaleación de níquel.

Propiedades y aplicaciones de los intermetálicos

Los compuestos intermetálicos, como el Ti_3Al y el Ni_3Al, mantienen sus resistencias e incluso desarrollan una ductilidad utilizable a altas temperaturas (figura 11-3). Sin embargo, la menor ductilidad ha impedido un mayor desarrollo de estos materiales. Se ha demostrado que la adición de niveles pequeños de boro (hasta 0.2%) puede incrementar la ductilidad del Ni_3Al policristalino. El incremento de los niveles de ductilidad podría permitir que estos compuestos se empleen en varias aplicaciones a altas temperaturas y para soporte de carga. Los compuestos ordenados de NiAl y Ni_3Al también son candidatos para participar en la construcción de aviones supersónicos, motores de jets y aviones comerciales de altas velocidades. No todas las aplicaciones de los intermetálicos son estructurales. Los basados en silicio (por ejemplo, el siliciuro de platino) desempeñan una función útil en la microelectrónica, y otros como el Nb_3Sn son útiles como superconductores.

11-3 Diagramas de fases que contienen reacciones de tres fases

Numerosos sistemas binarios producen diagramas de fases más complejos que los diagramas de fases isomorfos que se explicaron en el capítulo 10. Los sistemas que se expondrán en este contienen reacciones que involucran tres fases separadas. En la figura 11-4 se definen cinco de tales reacciones. Cada una de éstas puede identificarse en un diagrama de fases por medio del siguiente procedimiento:

1. Localice la línea horizontal en el diagrama de fases, la cual indica la presencia de una reacción de las tres fases, pero además señala la temperatura a la que ocurre la reacción en condiciones de equilibrio.
2. Ubique tres puntos distintos en esa línea: los dos puntos extremos más un tercero entre los dos anteriores. Este último punto representa la composición a la que ocurre la reacción de las tres fases. En la figura 11-4 el punto intermedio se muestra en el centro; sin embargo, en un diagrama de fases real, este punto no está necesariamente en el centro.
3. Después, observe arriba del punto intermedio e identifique la fase o fases presentes; luego, observe debajo del punto entre los puntos extremos e identifique la fase o fases presentes. Después escriba la reacción de la(s) fase(s) arriba del (los) punto(s) que se está(n) transformado en la(s) fase(s) debajo del punto. Compare esta reacción con las de la figura 11-4 e identifique la reacción.

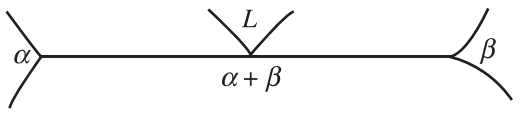
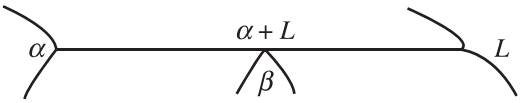
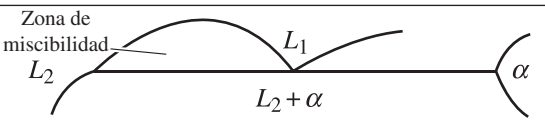
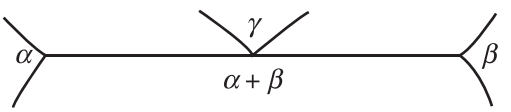
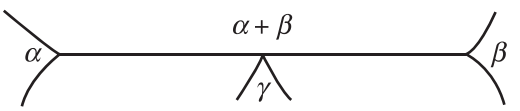
Eutéctica	$L \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritéctica	$\alpha + L \rightarrow \beta$	
Monotéctica	$L_1 \rightarrow L_2 + \alpha$	
Eutectoide	$\gamma \rightarrow \alpha + \beta$	
Peritectoide	$\alpha + \beta \rightarrow \gamma$	

Figura 11-4 Las cinco reacciones de las tres fases más importantes en los diagramas de fases binarios.

Ejemplo 11-1 *Identificación de las reacciones de tres fases*

Considere el diagrama de fases binario que se presenta en la figura 11-5. Identifique las reacciones que ocurren entre las tres.

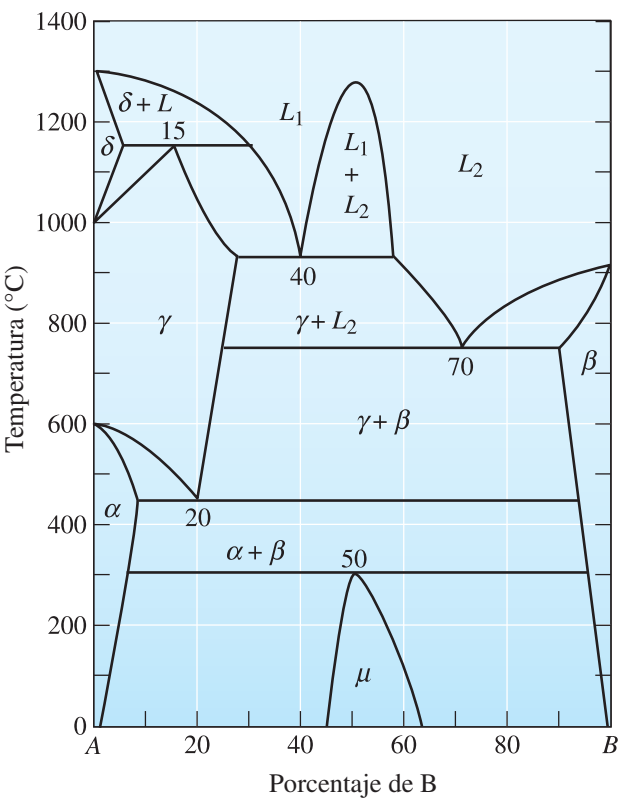


Figura 11-5 Diagrama de fases hipotético (ejemplo 11-1).

SOLUCIÓN

Se encuentran las líneas horizontales a 1,150°C, 920°C, 750°C, 450°C y 300°C. En 1150°C: esta reacción ocurre a 15% B (es decir, el punto intermedio está en 15% B). $\delta + L$ están presentes arriba del punto, y γ está debajo. La reacción es

$$\delta + L \rightarrow \gamma, \textit{ peritéctica}$$

920°C: esta reacción ocurre a 40% B:

$$L_1 \rightarrow \gamma + L_2, \textit{ monotéctica}$$

750°C: esta reacción ocurre a 70% B:

$$L \rightarrow \gamma + \beta, \textit{ eutéctica}$$

450°C: esta reacción ocurre a 20% B:

$$\gamma \rightarrow \alpha + \beta, \textit{ eutectoide}$$

300°C: esta reacción ocurre a 50% B:

$$\alpha + \beta \rightarrow \mu, \textit{ peritectoide}$$

Las reacciones eutécticas, **peritécticas** y **monotécticas** son parte del proceso de solidificación. Con frecuencia, las aleaciones que se utilizan para la colada o soldadura blanda aprovechan el punto de fusión bajo de la reacción eutéctica. El diagrama de fases de las aleaciones monotécticas contiene un domo, o **zona de miscibilidad**, en el que coexisten dos fases líquidas. En el sistema cobre-plomo, la reacción monotéctica produce glóbulos pequeños de plomo disperso, lo cual mejora la maquinabilidad de la aleación de cobre. Las reacciones peritécticas conducen a una solidificación y segregación sin equilibrio.

En muchos sistemas existe una **zona de miscibilidad metaestable**. En este caso, el domo de inmiscibilidad se extiende en la región subliquidus. En algunos casos, toda la zona de miscibilidad es metaestable (es decir, el domo de inmiscibilidad está por completo debajo del liquidus). Estos sistemas forman materiales, como los vidrios Vycor^{MR} y Pyrex®, también conocidos como vidrios de fases separadas.

Las reacciones eutectoides y **peritectoides** son por completo reacciones de estado sólido. La reacción eutectoide forma la base para el tratamiento térmico de varios sistemas de aleaciones, incluyendo el acero (capítulo 12). La reacción peritectoide es extremadamente lenta, y con frecuencia produce estructuras sin equilibrio no deseables en las aleaciones. Como se mencionó en el capítulo 5, la velocidad de difusión de los átomos en los sólidos es mucho menor que en los líquidos.

Cada una de estas reacciones de tres fases ocurre a una temperatura y composición fijas. La regla de las fases de Gibbs de una reacción de tres fases es (a presión constante),

$$1 + C = F + P$$

$$F = 1 + C - P = 1 + 2 - 3 = 0 \qquad (11\text{-}1)$$

dado que hay dos componentes C en un diagrama de fases binario, a la vez que tres fases P están involucradas en la reacción. Cuando las tres fases están en equilibrio durante la reacción, no hay grados de libertad. Como resultado, a estas reacciones se les llaman invariantes. La temperatura y la composición de cada fase involucrada en la reacción entre las tres fases son fijas. Observe que de las cinco reacciones que se explican aquí, sólo las eutécticas y eutectoides pueden conducir al endurecimiento por dispersión.

11-4 Diagrama de fases eutécticas

Los sistemas plomo-estaño sólo contienen una reacción eutéctica simple (figura 11-6). Este sistema de aleaciones es la base de las aleaciones más comunes que se utilizan para la soldadura blanda. Como se mencionó en el capítulo 9, debido a la toxicidad del Pb, se realizan esfuerzos intensos para reemplazar el plomo en las soldaduras de Pb-Sn. Sin embargo, se continuará empleando un sistema Pb-Sn para explicar el diagrama de fases eutécticas. En este sistema se examinan cuatro clases de aleaciones.

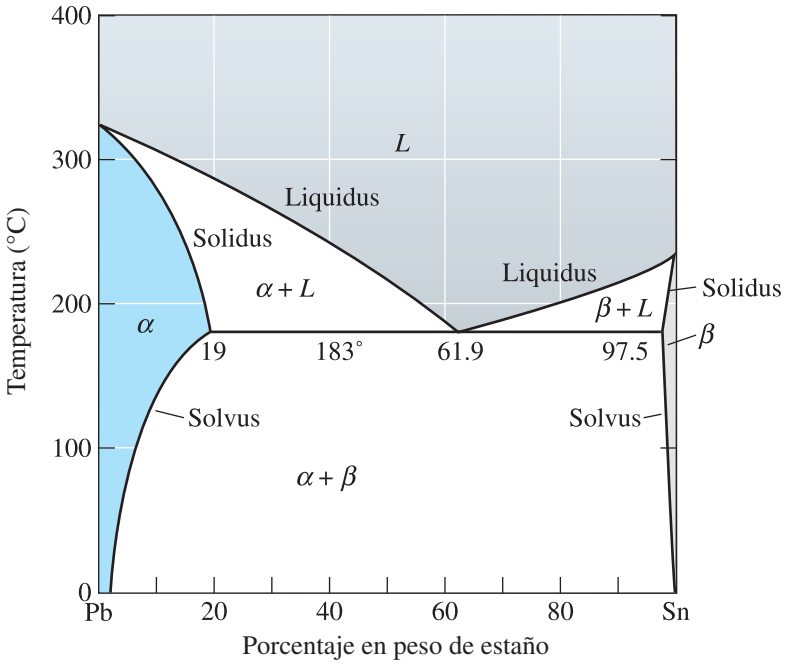


Figura 11-6 Diagrama de fases en equilibrio de plomo-estaño.

Es muy importante observar que en los diagramas de fases binarios no se emplean colores distintos para diferenciar las fases. Sin embargo, en los diagramas de fases de Pb-Sn se ha elegido hacerlo para ayudarle a visualizar las diversas microestructuras que se forman durante la solidificación. Las regiones de una fase de estos diagramas están coloreadas, mientras que las regiones de dos fases se muestran en blanco. El resto de los diagramas de fases se presentan en un solo tono para que se familiarice con su presentación convencional.

Aleaciones de soluciones sólidas

Las aleaciones que contienen de 0 a 2% de Sn se comportan exactamente como las aleaciones de cobre-níquel: se forma una solución sólida de una sola fase α durante la solidificación (figura 11-7). Estas aleaciones se endurecen por medio del endurecimiento por solución sólida, del endurecimiento por deformación y mediante el control del proceso de solidificación para refinar la estructura de los granos.

Aleaciones que exceden el límite de solubilidad

Las aleaciones que contienen entre 2 y 19% de Sn también se solidifican para producir una solución sólida de una sola fase α; sin embargo, a medida que la aleación continúa enfriándose, ocurre una reacción de estado sólido que permite que se precipite una segunda fase sólida (β) a partir de la fase original α (figura 11-8).

En este diagrama de fases, α es una solución sólida de estaño en plomo; sin embargo, la solubilidad del estaño en la solución sólida α es limitada. A 0°C, sólo puede disolverse 2% de Sn en α. A medida que aumenta la temperatura, se disuelve más estaño en el plomo hasta que, a 183°C, la solubilidad del estaño en el plomo ha aumentado a 19%. Esta es la solubilidad máxima del estaño en el plomo. La solubilidad del estaño en el plomo sólido a cualquier temperatura está dada por la curva de **solvus** (figura 11-6). Cualquier aleación que contenga entre 2 y 19% de Sn se enfría a través de solvus, se excede el límite de solubilidad y se forma una cantidad pequeña de β.

Se controlan las propiedades de este tipo de aleación por medio de varias técnicas, entre ellas, el endurecimiento por solución sólida de la porción α de la estructura, el control de la microestructura producida durante la solidificación y la cantidad y las características de la fase β. Estos tipos de composiciones, las cuales forman una sola fase sólida a temperaturas altas y dos fases sólidas a temperaturas más bajas, son adecuadas para endurecer por envejecimiento o por precipitación. En el capítulo 12 aprenderá las causas por las cuales los procesos sin equilibrio son necesarios para fabricar aleaciones endurecidas por precipitación. A la línea vertical en un diagrama de fases (por ejemplo, la figura 11-8) que muestra una composición específica se le conoce como **isopleta**. La determinación de las reacciones que ocurren durante el enfriamiento de una composición en particular se conoce como

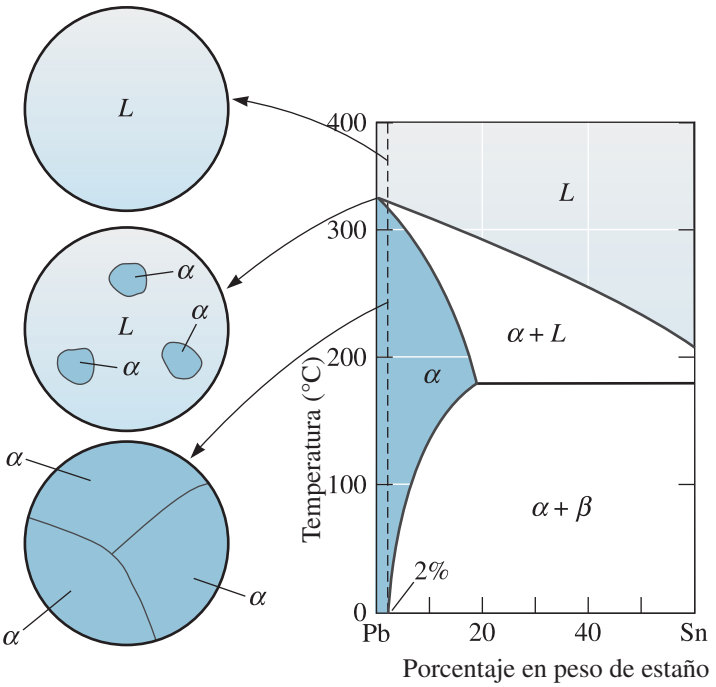


Figura 11-7 Solidificación y microestructura de una aleación de Pb-2% Sn. La aleación es una solución sólida de una sola fase.

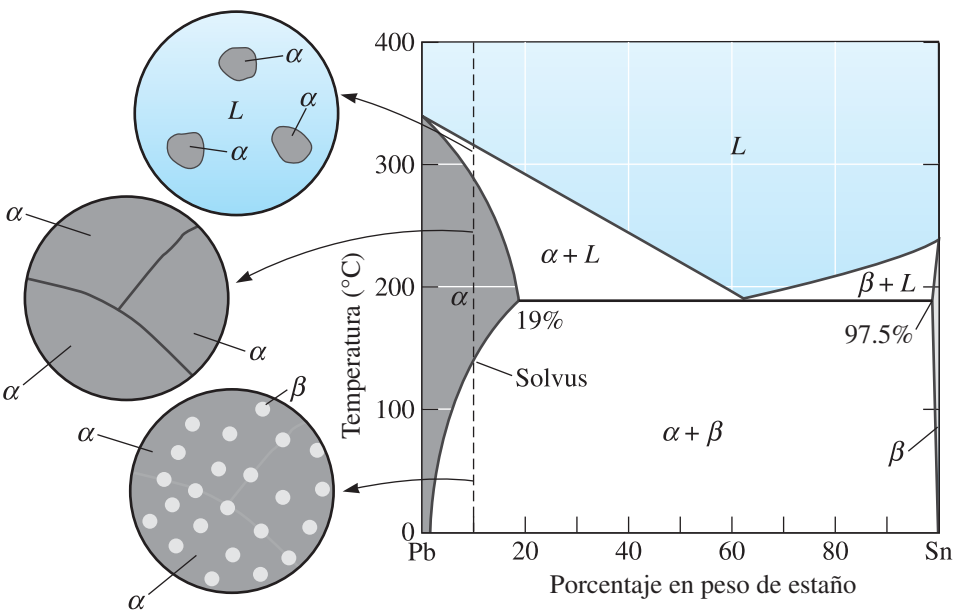


Figura 11-8 Solidificación, precipitación y microestructura de una aleación de Pb-10% Sn. Ocurre algo de endurecimiento por dispersión a medida que se precipita el sólido β.

estudio isopletal. El siguiente ejemplo ilustra cómo pueden desarrollarse ciertos cálculos relacionados con la composición de las fases y sus concentraciones relativas.

Ejemplo 11-2 *Fases del diagrama de fases de plomo-estaño (Pb-Sn)*

Determine *a*) la solubilidad del estaño en el plomo sólido a 100°C, *b*) la solubilidad máxima del plomo en el estaño sólido, *c*) la cantidad de β que se forma si se enfría a 0°C una aleación de Pb-10% Sn, *d*) las masas del estaño contenido en las fases α y β y *e*) la masa del plomo contenido en las fases α y β. Suponga que la masa total de la aleación de Pb-10% Sn es de 100 gramos.

SOLUCIÓN

En la figura 11-8 se muestra el diagrama de fases necesario. Todos los porcentajes se muestran en porcentaje en peso.

a) La temperatura de 100°C interseca la curva de solvus en 6% de Sn. Por lo tanto, la solubilidad del estaño en el plomo a 100 °C es de 6%.

b) La solubilidad máxima del plomo en el estaño, la cual se encuentra a partir del lado rico en estaño del diagrama de fases, ocurre a la temperatura eutéctica de 183°C y es de 97.5% de Sn o 2.5% de Pb.

c) A 0°C, la aleación de 10% de Sn está en la región $\alpha + \beta$ del diagrama de fases. Si se traza la línea de interconexión a 0°C y se aplica la regla de la palanca, se encuentra que

$$\% \beta = \frac{10 - 2}{100 - 2} \times 100 = 8.2\%$$

Observe que la línea de interconexión interseca la curva de solvus de la solubilidad del Pb en Sn a una concentración distinta de cero de Sn. No se puede leer con exactitud a partir del diagrama; sin embargo, se supone que el punto a la derecha de la línea de intersección es de 100% de Sn. El porcentaje (%) de α sería (100 − % de β) = 91.8%. Este resultado significa que si se tienen 100 g de la aleación con 10% de Sn, consistirá en 8.2 g de la fase β y 91.8 g de la fase α.

d) Observe que 100 g de la aleación consistirán en 10 g de Sn y 90 g de Pb. El Pb y el Sn están distribuidos en dos fases (es decir, α y β). La masa del Sn en la fase α = (2% Sn)(91.8 g de la fase α) = (0.02)(91.8 g) = 1.836 g. Dado que el estaño (Sn) aparece en las fases α y β, la masa del Sn en la fase β será = (10 − 1.836) g = 8.164 g. Note que, en este caso, la fase β a 0°C es casi Sn puro.

e) Ahora se calcula la masa de plomo en las dos fases. La masa del Pb en la fase α será igual a la masa de la fase α menos la masa de Sn en la fase α = 91.8 g − 1.836 g = 89.964 g. También se pudo haber calculado esto como

Masa de Pb en la fase α = (98% Pb)(91.8 g de la fase α) = (0.98)(91.8 g) = 89.964 kg

Se conoce la masa total de plomo (90 g) y también la masa de plomo en la fase α. Por lo tanto, la masa de Pb en la fase β = 90 − 89.964 = 0.036 g. Este resultado es consistente con lo que se dijo antes (es decir, la fase β, en este caso, es casi estaño puro).

Aleaciones eutécticas

La aleación que contiene 61.9% de Sn tiene composición eutéctica (figura 11-9). La palabra eutéctica proviene del griego *eutectos* que significa fusionado con facilidad. En realidad, en un sistema binario que muestre una reacción eutéctica, una aleación con una composición eutéctica tiene la temperatura más baja de fusión. Esta es la composición en la que no hay intervalo de solidificación (es decir, la solidificación de esta aleación ocurre a una temperatura, 183°C en el sistema Pb-Sn). Por encima de los 183°C la aleación es toda líquida y, por lo tanto, debe contener 61.9% de Sn. Después de que el líquido se enfría a 183°C, comienza la reacción eutéctica:

$$L_{61.9\%\,\mathrm{Sn}} \rightarrow \alpha_{19\%\,\mathrm{Sn}} + \beta_{97.5\%\,\mathrm{Sn}} \qquad (11\text{-}2)$$

Durante la reacción eutéctica se forman dos soluciones sólidas, α y β. Las composiciones de las dos soluciones sólidas están dadas por los extremos de la línea eutéctica.

Durante la solidificación, el crecimiento del eutéctico requiere la eliminación del calor latente de fusión y la redistribución por difusión de las dos especies atómicas distintas. Dado que la solidificación ocurre por completo a 183°C, la curva de enfriamiento (figura 11-10) es similar a la de un metal puro; es decir, ocurre una estabilización térmica o una meseta a la temperatura eutéctica. En el capítulo 9 se afirmó que la aleación se solidifica en un intervalo de temperaturas (entre el liquidus y el solidus) conocido como intervalo de solidificación. Las composiciones eutécticas son una

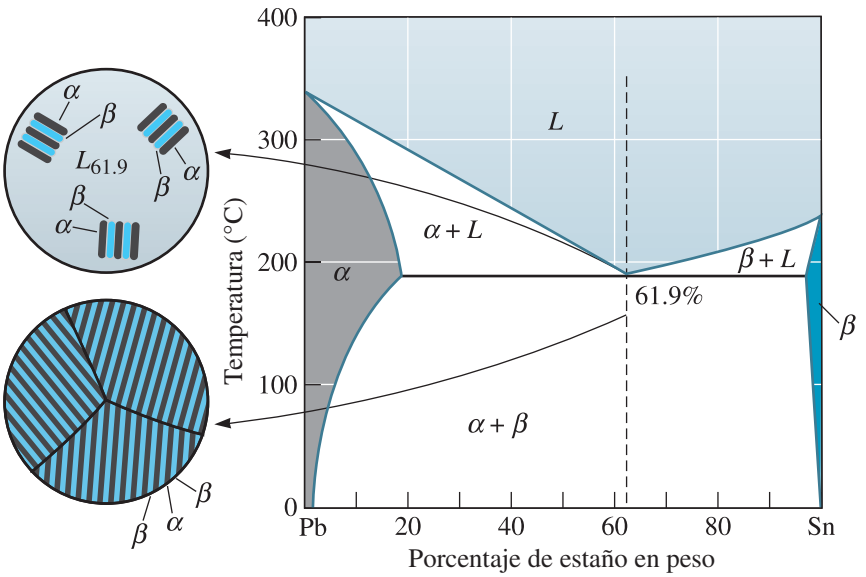


Figura 11-9 Solidificación y microestructura de la aleación eutéctica de Pb-61.9% Sn.

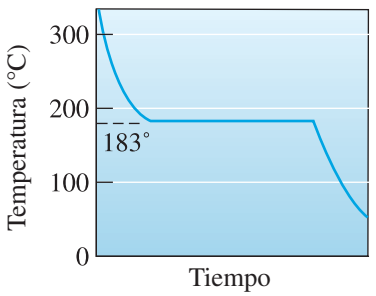
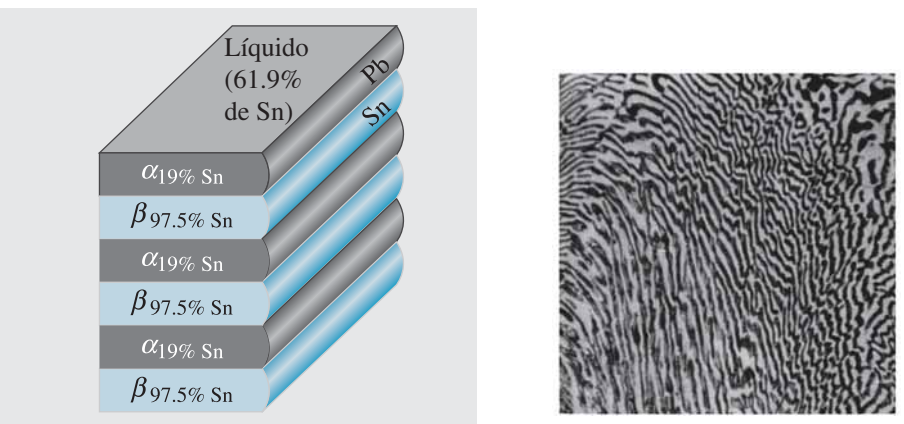


Figura 11-10 La curva de enfriamiento de una aleación eutéctica es una estabilización térmica simple, dado que los eutécticos se solidifican o se fusionan a una sola temperatura.

excepción a esta regla, dado que se transforman de líquido a sólido a una temperatura constante (es decir, la temperatura eutéctica).

A medida que los átomos se redistribuyen durante la solidificación eutéctica, se desarrolla una microestructura característica. En el sistema plomo-estaño, las fases sólidas α y β crecen del líquido en un arreglo **laminar**, parecido a una placa (figura 11-11). La estructura laminar permite que



a) *b*)

Figura 11-11 *a*) Redistribución atómica durante el crecimiento laminar de un eutéctico de plomo-estaño. Los átomos de estaño del líquido se difunden de manera preferencial hacia las placas β mientras que los de plomo lo hacen hacia las placas α. *b*) Fotomicrografía del microconstituyente eutéctico de plomo-estaño (400 ×). (*Reimpresión por cortesía de Don Askeland*)

los átomos de plomo y estaño se muevan a través del líquido, en el cual la difusión es rápida, sin que tengan que moverse una distancia considerable. Esta estructura laminar es característica de varios otros sistemas eutécticos.

El producto de la reacción eutéctica tiene un arreglo característico de las dos fases sólidas llamado **microconstituyente eutéctico**. En la aleación de Pb-61.9% Sn, se forma 100% del microconstituyente eutéctico, dado que todo el líquido pasa a través de la reacción. El siguiente ejemplo muestra cómo pueden calcularse las cantidades y composiciones de las fases presentes en una aleación eutéctica.

Ejemplo 11-3 *Cantidad de fases en una aleación eutéctica*

a) Determine la cantidad y composición de cada fase de una aleación de composición eutéctica de plomo-estaño de 200 g inmediatamente después de que se ha completado la reacción eutéctica. *b*) Calcule la masa de las fases presentes. *c*) Calcule las masas de plomo y estaño en cada fase.

SOLUCIÓN

a) La aleación eutéctica contiene 61.9% de Sn. Se aplica la ley de la palanca a una temperatura justo por debajo de la eutéctica, esto es, a 182°C, dado que es la temperatura a la que la reacción eutéctica recién se completa. El fulcro de la palanca está a 61.9% de Sn. La composición de α es Pb-19% Sn y la de β es Pb-97.5% Sn. Los extremos de la línea de interconexión coinciden de manera aproximada con los extremos de la línea eutéctica.

$$\alpha\text{: (Pb} - 19\%\text{ Sn) \% } \alpha = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.0} \times 100 = 45.35\%$$

$$\beta\text{: (Pb} - 97.5\%\text{ Sn) \% } \beta = \frac{61.9 - 19.0}{97.5 - 19.0} \times 100 = 54.65\%$$

De otra manera se podría decir que la fracción en peso de la fase α es de 0.4535 y la de la fase β es de 0.5465.

Una muestra de 200 g de la aleación contendría un total de $200 \times 0.6190 = 123.8$ g de Sn y 76.2 g de plomo. La masa total de plomo y estaño no cambia como resultado de la conservación de la masa. Lo que cambia es la masa de plomo y estaño en las diferentes fases.

b) A una temperatura justo por debajo de la eutéctica:

La masa de la fase α en 200 g de la aleación

= masa de la aleación × fracción de la fase α

= 200 g × 0.4535 = 90.7 g

La cantidad de la fase β en 200 g de la aleación

= (masa de la aleación − masa de la fase α)

= 200.0 g − 90.7 = 109.3 g

También se podría escribir este resultado como

La cantidad de la fase β en 200 g de la aleación

= masa de la aleación × fracción de la fase β

= 200 g × 0.5465 = 109.3 g

Por lo tanto, a una temperatura justo por debajo de la eutéctica (es decir, a 182°C), la aleación contiene 109.3 g de la fase β y 90.7 g de la fase α.

c) Ahora se calculan las masas de plomo y estaño en las fases α y β: Masa de Pb en la fase α = masa de la fase α en 200 g $\times$ (fracción en peso de Pb en α)

Masa de Pb en la fase $\alpha = 90.7 \text{ g} \times (1 - 0.19) = 73.5 \text{ g}$

Masa de Sn en la fase α = masa de la fase α − masa de Pb en la fase α

Masa de Sn en la fase $\alpha = (90.7 - 73.5 \text{ g}) = 17.2 \text{ g}$

Masa de plomo en la fase β = masa de la fase β en 200 g $\times$ (fracción en peso de Pb en β)

Masa de plomo en la fase $\beta = (109.3 \text{ g}) \times (1 - 0.975) = 2.7 \text{ g}$

Masa de Sn en la fase β = masa total de Sn − masa de Sn en la fase α

Masa de Sn en la fase $\beta = 123.8 \text{ g} - 17.2 \text{ g} = 106.6 \text{ g}$

Observe que se pudo haber obtenido el mismo resultado si se consideraba la masa total de plomo como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}\text{Masa total de plomo en la aleación} &= \text{masa de plomo en la fase } \alpha \\ &\quad + \text{masa de plomo en la fase } \beta \\ 76.2 \text{ g} &= 73.5 \text{ g} + \text{masa de plomo en la fase } \beta \\ \text{Masa de plomo en la fase } \beta &= 76.2 - 73.5 \text{ g} = 2.7 \text{ g}\end{aligned}$$

La figura 11-12 resume las varias concentraciones y masas. Este análisis confirma que la mayor parte de plomo en la aleación eutéctica se concentra en la fase α, mientras que la mayor parte del estaño lo hace en la fase β.

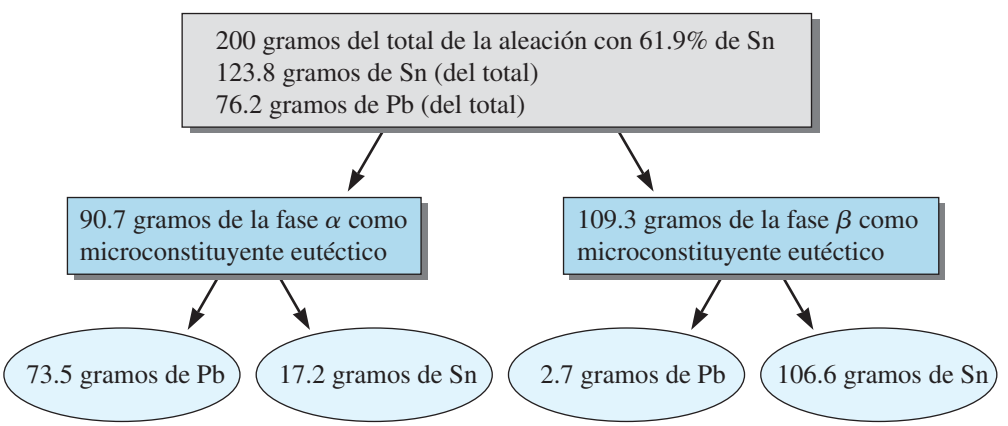


Figura 11-12 Resumen de los cálculos (ejemplo 11-3).

Aleaciones hipoeutécticas e hipereutécticas

Una **aleación hipoeutéctica** tiene una composición entre la del extremo izquierdo de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica. A medida que una aleación hipoeutéctica que contiene entre 19 y 61.9% de Sn se enfría, el líquido comienza a solidificarse a la temperatura de liquidus para producir un sólido α; sin embargo, la solidificación se completa al pasar a través de la reacción

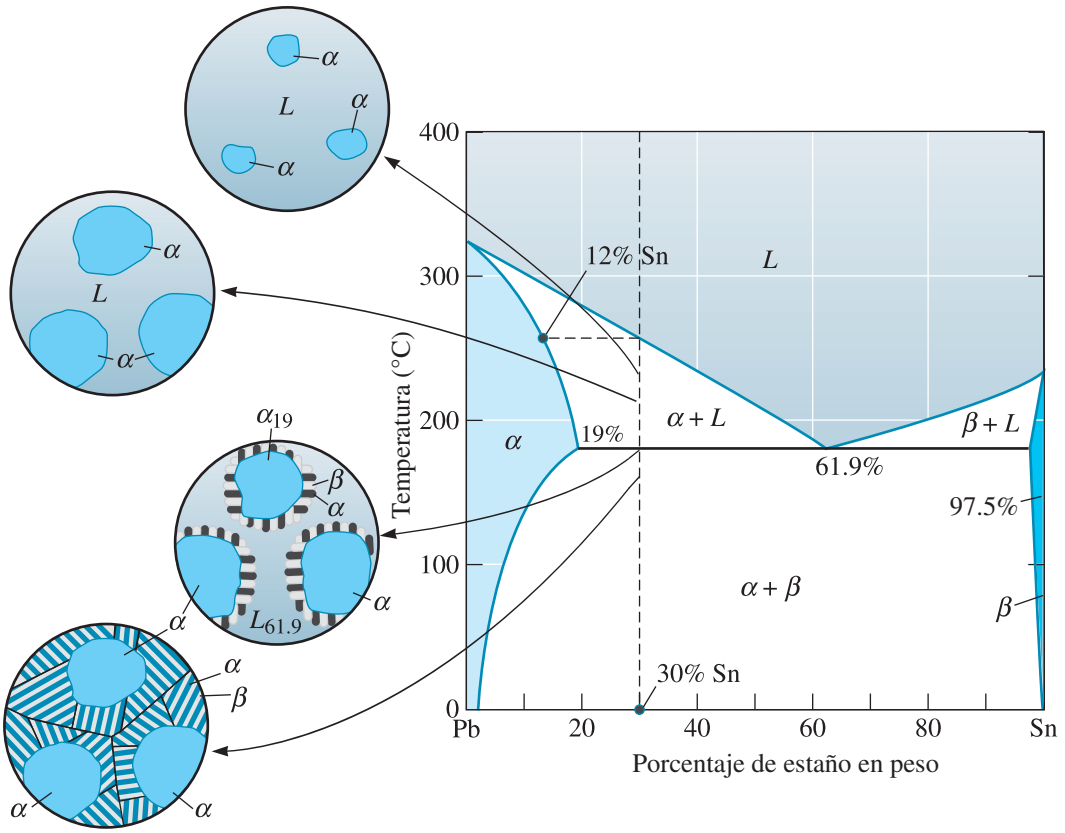


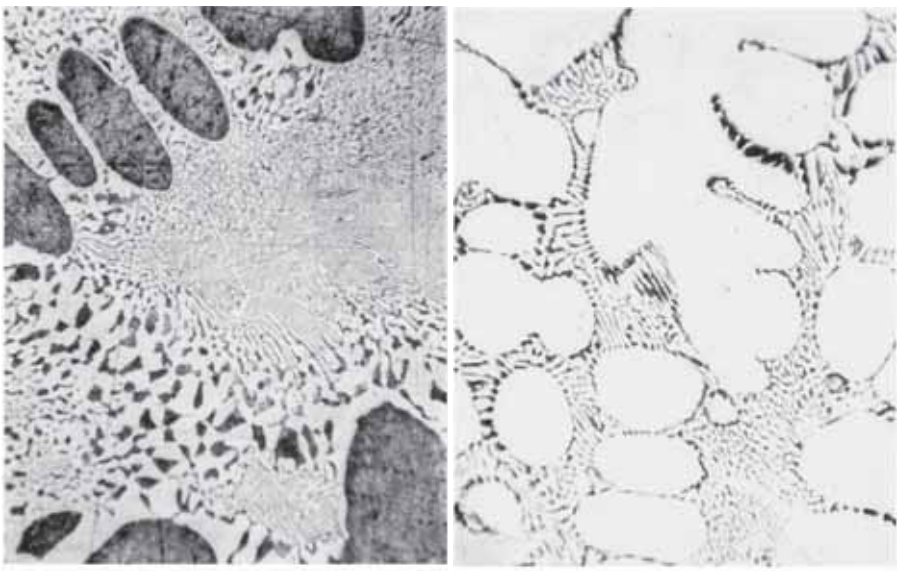
Figura 11-13 Solidificación y microestructura de una aleación hipoeutéctica (Pb-30% Sn).

eutéctica (figura 11-13). Esta secuencia de solidificación ocurre en el caso de las composiciones en las que la línea vertical que corresponde a la composición original de la aleación atraviesa el liquidus y el eutéctico.

A la composición de una aleación que se encuentra entre la del extremo derecho de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica se le conoce como **aleación hipereutéctica**. En el sistema Pb-Sn, cualquier composición entre 61.9 y 97.5% de Sn es hipereutéctica.

Consideremos una aleación hipoeutéctica que contiene Pb-30% Sn y siga los cambios en la estructura durante la solidificación (figura 11-13). Cuando se alcanza la temperatura de liquidus de 260°C, el sólido α que contiene alrededor de 12% de Sn nuclea. El sólido α crece hasta que la aleación se enfría justo por debajo de la temperatura eutéctica. A 184°C se traza una línea de interconexión y se encuentra que el sólido α contiene 19% de Sn y el líquido restante tiene 61.9% de Sn. Además, se observa que a 184°C, ¡el líquido contiene la composición eutéctica! Cuando la aleación se enfría por debajo de 183°C, todo el líquido restante pasa por la reacción eutéctica y se transforma en una mezcla laminar de α y β y da por resultado la microestructura que se muestra en la figura 11-14*a*). Observe que el microconstituyente eutéctico que rodea el sólido α que se forma entre las temperaturas de liquidus y la eutéctica es continuo y que la fase primaria se dispersa entre las colonias del microconstituyente eutéctico.

La fase sólida α que se forma cuando el líquido se enfría entre las temperaturas de liquidus y la de eutéctico se llama **microconstituyente primario** o **proeutéctico**. Este sólido α no toma parte en la reacción eutéctica. Por lo tanto, su morfología y apariencia son distintas de las de la fase α que aparece en el microconstituyente eutéctico. Con frecuencia se comprueba que las cantidades y las composiciones de los microconstituyentes son de mayor utilidad que las cantidades y las composiciones de las fases.



a) *b*)

Figura 11-14 *a*) Aleación hipoeutéctica de plomo-estaño. *b*) Aleación hipereutéctica de plomo-estaño. El constituyente oscuro es el sólido α rico en plomo, el claro es el sólido β rico en estaño, mientras que la estructura de placa fina es el eutéctico (400 ×). (*Micrografías reimpresas por cortesía de Don Askeland*)

Ejemplo 11-4 *Determinación de las fases y las cantidades de una aleación hipoeutéctica de Pb-30% Sn*

En una aleación de Pb-30% Sn, determine las fases presentes, sus cantidades y composiciones a 300°C, 200°C, 184°C, 182°C y 0°C.

SOLUCIÓN

Temperatura (°C)	Fases	Composiciones	Cantidades
300	L	L: 30% Sn	$L = 100\%$
200	$\alpha + L$	L: 55% Sn	$L = \frac{30 - 18}{55 - 18} \times 100 = 32\%$
		α: 18% Sn	$\alpha = \frac{55 - 30}{55 - 18} \times 100 = 68\%$
184	$\alpha + L$	L: 61.9% Sn	$L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\%$
		α: 19% Sn	$\alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\%$
182	$\alpha + \beta$	α: 19% Sn	$\alpha = \frac{97.5 - 30}{97.5 - 19} \times 100 = 86\%$
		β: 97.5% Sn	$\beta = \frac{30 - 19}{97.5 - 19} \times 100 = 14\%$
0	$\alpha + \beta$	α: 2% Sn	$\alpha = \frac{100 - 30}{100 - 2} \times 100 = 71\%$
		β: 100% Sn	$\beta = \frac{30 - 2}{100 - 2} \times 100 = 29\%$

Observe que en estos cálculos se han redondeado las fracciones al porcentaje más cercano. Esto puede dar problemas si se calcularan las masas de distintas fases, ya que no se podría conservar

el balance de las masas. Por lo general es una buena idea no redondear estos porcentajes si se van a efectuar cálculos que traten con cantidades de distintas fases o masas de elementos en fases diferentes.

Ejemplo 11-5 *Cantidad y composición del microconstituyente de una aleación hipoeutéctica*

Determine las cantidades y composiciones de cada microconstituyente en una aleación de Pb-30% Sn inmediatamente después de que se ha completado la reacción eutéctica.

SOLUCIÓN

Esta es una composición hipoeutéctica. Por lo tanto, los microconstituyentes esperados son α primario y el eutéctico. Observe que se tienen, como antes, sólo dos fases (α y β).

Se pueden determinar las cantidades y composiciones de los microconstituyentes si se observa cómo se forman. El microconstituyente α *primario* es todo el sólido α que se forma antes de que la aleación se enfríe a la temperatura eutéctica; el microconstituyente eutéctico es todo el líquido que pasa por la reacción eutéctica. A una temperatura justo por debajo de la eutéctica —alrededor de 184°C— las cantidades y composiciones de las dos fases son

$$\alpha\text{: } 19\%\ \text{Sn},\ \%\,\alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\% = \%\,\alpha \text{ primario}$$

$$L\text{: } 61.9\%\ \text{Sn},\ \%\,L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\% = \%\text{ eutéctico a } 182°\text{C}$$

Por lo tanto, el microconstituyente α primario se obtiene determinando la cantidad de α presente a la temperatura justo por debajo de la eutéctica. La cantidad del microconstituyente eutéctico a una temperatura *justo por debajo* de la eutéctica (por ejemplo, de 182°C) se determina mediante el cálculo de la cantidad del líquido *justo por encima* de la temperatura eutéctica (por ejemplo, a 184°C), dado que todo este líquido de la composición eutéctica se transforma en el microconstituyente eutéctico. Observe que a la temperatura eutéctica (183°C), la reacción eutéctica está en progreso (se completa la formación del proeutéctico α); por ello, la cantidad del microconstituyente eutéctico a 183°C cambiará con el tiempo (comenzará en 0% y finalizará en 26% de eutéctico, en este caso). Por favor, asegúrese de que comprende este ejemplo, dado que varios estudiantes tienden a fallar en la forma en que se desarrolla este cálculo.

Cuando la aleación se enfría por debajo de la temperatura eutéctica a 182°C, todo el líquido a 184°C se transforma en el eutéctico y la composición del microconstituyente eutéctico es de 61.9% de Sn. La fase sólida α presente a 184°C permanece sin cambiar después de enfriarse a 182°C y es el microconstituyente primario.

La curva de enfriamiento de una aleación hipoeutéctica está conformada por aquellas de las aleaciones de solución sólida y las aleaciones eutécticas "rectas" (figura 11-15). Ocurre un cambio en la pendiente del liquidus a medida que la α primaria comienza a formarse. La evolución del calor latente de fusión disminuye la rapidez de enfriamiento a medida que el sólido α crece. Cuando la aleación se enfría a la temperatura eutéctica, se produce una estabilización térmica a medida que la reacción eutéctica procede a 183°C. Esta secuencia de solidificación es similar en una aleación hipereutéctica, lo que genera la microestructura que se muestra en la figura 11-14*b*).

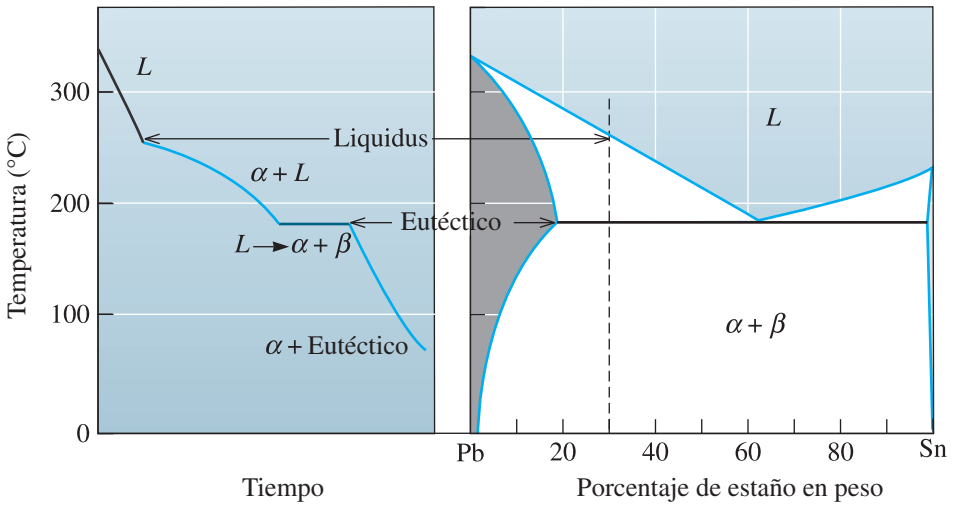


Figura 11-15 Curva de enfriamiento de una aleación hipoeutéctica de Pb-30% Sn.

11-5 Resistencia de las aleaciones eutécticas

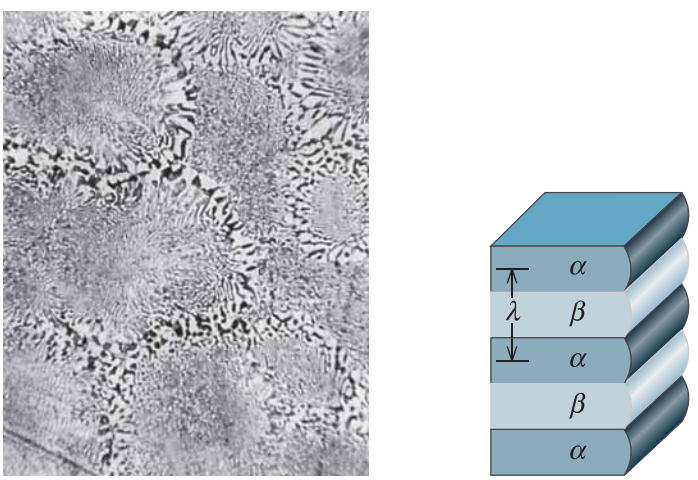
Cada fase de la aleación eutéctica está, hasta cierto grado, endurecida por solución sólida. En el sistema plomo-estaño, α, la cual es una solución sólida de estaño en plomo, es más resistente que el plomo puro (capítulo 10). Algunas aleaciones eutécticas pueden endurecerse por medio de trabajo en frío. También se controla el tamaño de los granos si se agregan inoculantes o refinadores apropiados de granos durante la solidificación. Por último, se puede influir en las propiedades si se controla la cantidad y la microestructura del eutéctico.

Tamaño de las colonias eutécticas

Cada una de las colonias eutécticas nuclean y crecen de manera independiente. Dentro de cada una de ellas, la orientación de las láminas en el microconstituyente eutéctico es idéntica, pero cambia cuando atraviesa un límite de las colonias [figura 11-16*a*)]. Es posible perfeccionar las colonias eutécticas y mejorar la resistencia de la aleación eutéctica por medio de la inoculación (capítulo 9).

Espaciamiento interlaminar

El **espaciamiento interlaminar** de un eutéctico es la distancia del centro de una lámina α al centro de la siguiente lámina α [figura 11-16*b*)]. Un espacia-



a) ***b)***

Figura 11-16 *a*) Colonias en el eutéctico de plomo-estaño (300 ×). *b*) Espaciamiento interlaminar en una microestructura eutéctica.

miento interlaminar pequeño indica que el tamaño del área de la interfase α a β es grande. Por lo tanto, un espaciamiento interlaminar pequeño incrementa la resistencia del eutéctico.

El espaciamiento interlaminar está determinado principalmente por la velocidad de crecimiento del eutéctico,

$$\lambda = cR^{-1/2} \tag{11-3}$$

donde R es la velocidad de crecimiento (cm/s) y c es una constante. En la figura 11-17 se muestra el espaciamiento interlaminar del eutéctico de plomo-estaño. Se puede incrementar la rapidez de crecimiento R, y en consecuencia reducir el espaciamiento interlaminar, si se incrementa la velocidad de enfriamiento o se reduce el tiempo de solidificación.

Cantidad de eutéctico

También se controlan las propiedades por medio de las cantidades relativas del microconstituyente primario y del eutéctico. En el sistema plomo-estaño, la cantidad del microconstituyente eutéctico cambia de 0 a 100% cuando se incrementa el contenido de estaño de 19 a 61.9%. Debido al incremento de las cantidades del microconstituyente eutéctico más resistente, la resistencia de la aleación aumenta (figura 11-18). De manera similar, cuando se incrementa el plomo que se agrega al estaño de 2.5 a 38.1% de Pb, la cantidad de β primario en la aleación hipereutéctica disminuye, mientras que la cantidad del eutéctico resistente y la resistencia se incrementan. Cuando las fases individuales tienen casi la misma resistencia, se espera que la aleación eutéctica tenga la resistencia más alta debido al endurecimiento efectivo por dispersión.

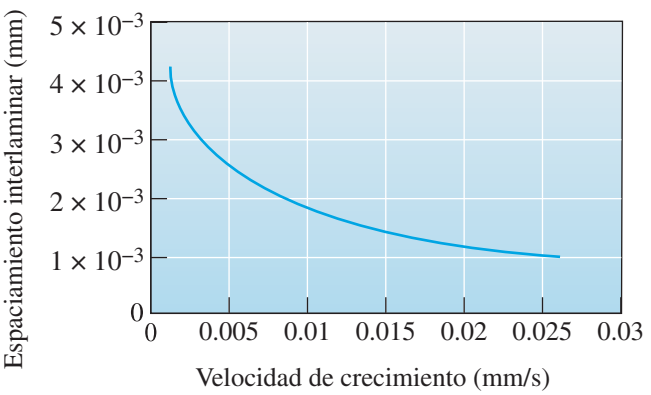


Figura 11-17 Efecto de la velocidad de crecimiento sobre el espaciamiento interlaminar en el eutéctico de plomo-estaño

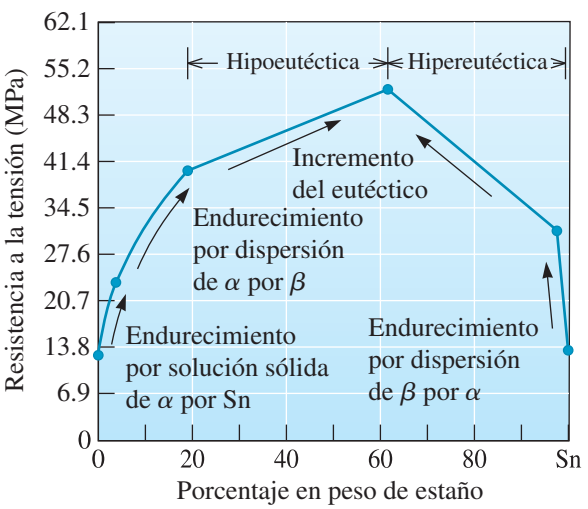


Figura 11-18 Efecto de la composición y del mecanismo de endurecimiento sobre la resistencia a la tensión de las aleaciones de plomo-estaño.

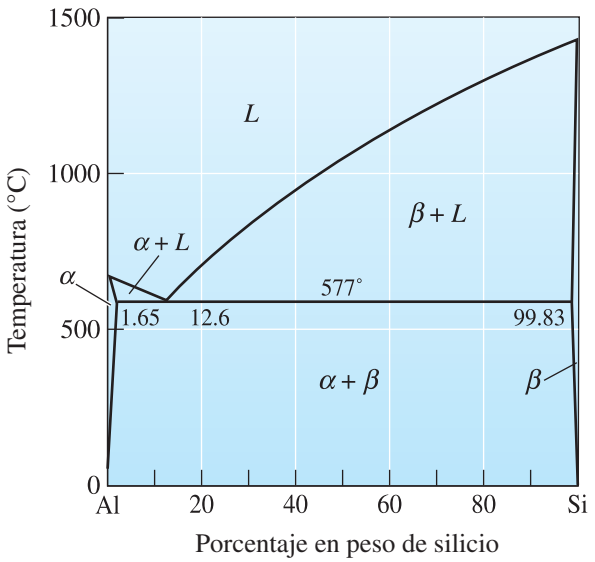


Figura 11-19 Diagrama de fases aluminio-silicio.

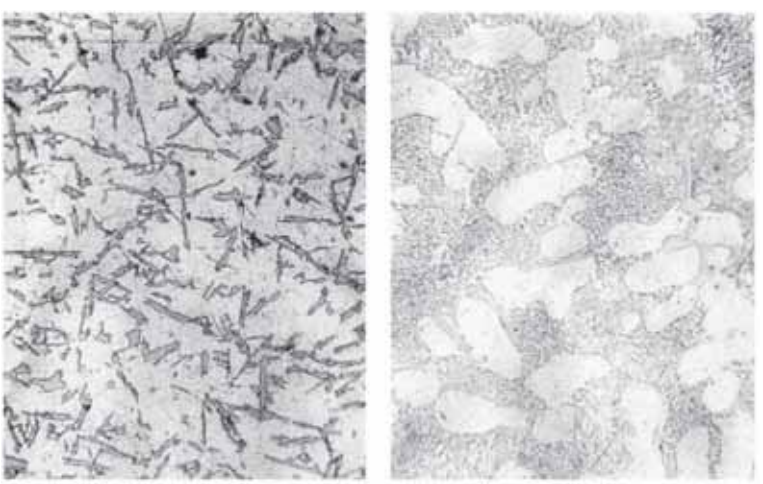
Microestructura del eutéctico

No todos los eutécticos generan una estructura laminar. Las formas de las dos fases en el microconstituyente son influidas por la velocidad de enfriamiento, la presencia de elementos impuros y la naturaleza de la aleación.

El diagrama de fases del eutéctico de aluminio-silicio (figura 11-19) forma la base de una variedad de aleaciones comerciales importantes. La parte de silicio del eutéctico crece en forma de placas planas delgadas que aparecen como agujas en una microfotografía [figura 11-20*a*)]. Las plaquetas de silicio quebradizas concentran los esfuerzos y reducen la ductilidad y la tenacidad.

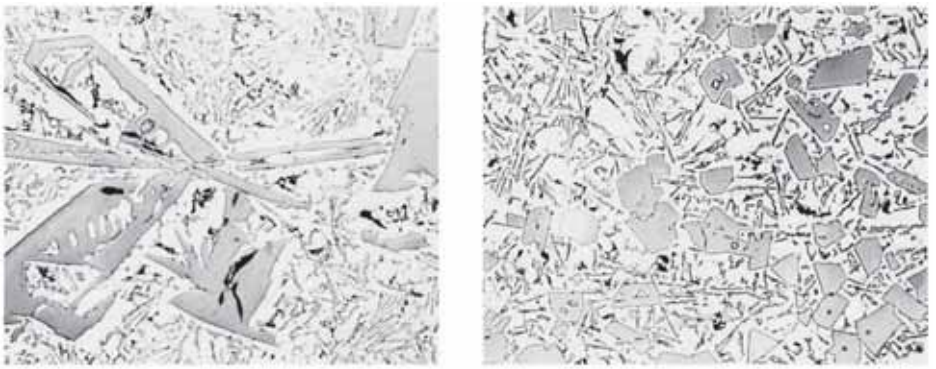
La microestructura eutéctica de las aleaciones de aluminio-silicio se altera por medio de la adición de elementos de aleación en un proceso conocido como modificación. La **modificación** provoca que la fase de silicio crezca como barras delgadas interconectadas entre las dendritas del aluminio [figura 11-20*b*)], lo cual mejora la resistencia a la tensión y el porcentaje de elongación. En dos dimensiones, el silicio modificado parece estar compuesto por partículas redondas pequeñas. Las aleaciones enfriadas de manera rápida, como aquellas que se utilizan para el colado en matriz, son modificadas de manera natural durante la solidificación. Sin embargo, a velocidades de enfriamiento menores debe agregarse alrededor de 0.02% de Na o 0.01% de Sr para provocar la modificación.

La forma de la fase primaria también es importante. Con frecuencia, ésta crece de manera dendrítica; la disminución del espaciamiento de las ramas de dendritas secundarias de la fase primaria puede mejorar las propiedades de la aleación. En las elaciones hipereutécticas de aluminio-silicio,



a) ***b)***

Figura 11-20 Microestructuras eutécticas comunes: *a*) placas de silicio parecidas a agujas en el eutéctico de aluminio-silicio (100 ×) y *b*) barras de silicio redondas en el eutéctico modificado de aluminio-silicio (100 ×). (*Reimpresión por cortesía de Don Askeland*)



a) *b*)

Figura 11-21 Efecto del endurecimiento con fósforo sobre la microestructura de las aleaciones hipereutécticas de aluminio-silicio: *a*) el silicio primario grueso y *b*) el silicio primario fino, refinado por la adición de fósforo (75×). [*De* ASM Handbook, *vol. 7, (1972), ASM International, Materiales Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados, www.asminternational.org.*]

la β gruesa es la fase primaria [figura 11-21*a*)]. Debido a que β es dura, las aleaciones hipereutécticas son resistentes al desgaste y se usan para producir partes de motores para automóviles, pero la β gruesa provoca una maquinabilidad deficiente y segregación por gravedad (donde la β primaria flota hacia la superficie de la pieza colada durante la solidificación). La adición de 0.05% de fósforo promueve la nucleación del silicio primario, refina su tamaño y minimiza sus cualidades nocivas [figura 11-21*b*)]. Los dos ejemplos siguientes muestran cómo pueden diseñarse las composiciones eutécticas para que alcancen ciertos niveles de propiedades mecánicas.

Ejemplo 11-6 *Diseño de materiales de una soldadura por frotamiento*

Una manera de reparar las abolladuras en un metal es frotar un material parcialmente líquido-parcialmente sólido en la abolladura y después permitir que este material de relleno se solidifique. Para realizar esta aplicación, dicho material debe tener las siguientes especificaciones: 1) una temperatura de fusión por debajo de 230°C, 2) una resistencia a la tensión en exceso de 42 MPa, 3) ser entre 60 a 70% líquido durante la aplicación y 4) ser lo más económico posible. Diseñe una aleación y un procedimiento de reparación que cumplan estas especificaciones. Puede que le sea útil considerar una aleación de Pb-Sn.

SOLUCIÓN

Debe ver si una de las aleaciones de Pb-Sn cumplirá estas condiciones. Primero, la aleación debe contener más de 40% de Sn para que tenga una temperatura de fusión por debajo de 230°C (figura 11-6). Esta temperatura baja facilita realizar las reparaciones aplicando el relleno.

Segundo, la figura 11-18 indica que el contenido de estaño debe estar entre 23 y 80% para obtener la resistencia a la tensión requerida de 42 MPa. En combinación con el primer requerimiento, cualquier aleación que contenga entre 40 y 80% de Sn será satisfactoria.

Tercero, el costo del estaño es de alrededor de 5.50 dólares/kg, mientras que el del plomo es de 0.55 dólares/kg. Por lo tanto, una aleación de Pb-40% Sn podría ser la elección más económica. También existen otras consideraciones, como ¿cuál es la geometría? ¿La aleación puede fluir bien en esa geometría (es decir, la viscosidad del metal fundido)?

Por último, el material de relleno debe estar a la temperatura correcta para ser de 60 a 70% líquido. Como muestran los cálculos que aparecen abajo, la temperatura debe estar entre 200 y 210°C:

$$\%\, L_{200} = \frac{40 - 18}{55 - 18} \times 100 = 60\%$$

$$\%\, L_{210} = \frac{40 - 17}{50 - 17} \times 100 = 70\%$$

Por lo tanto, se recomienda usar una aleación de Pb-40% Sn aplicada a 205°C, una temperatura a la que será 65% líquida y 35% α primaria. Como ya se mencionó, también se debe poner atención a la toxicidad del plomo y a cualquier responsabilidad legal que pueda provocar el uso de tales materiales. Se han inventado varias soldaduras nuevas libres de plomo.

Ejemplo 11-7 *Diseño de una pieza resistente al desgaste*

Diseñe un componente cilíndrico ligero que proporcione una resistencia al desgaste excelente en la pared interna, pero que mantenga una ductilidad y tenacidad generales razonables. Tal producto podría usarse como una camisa de cilindro en un motor de automóvil.

SOLUCIÓN

Numerosas piezas resistentes al desgaste se producen a partir de aceros, los cuales tienen una densidad relativamente alta, pero las aleaciones hipereutécticas de Al-Si que contienen β primaria pueden otorgar la resistencia al desgaste que se desea a un tercio del peso del acero.

Dado que la pieza tiene forma cilíndrica, el colado centrífugo (figura 11-22) podría ser el único método para producirla. En el colado centrífugo, se vierte el metal líquido en un molde rotatorio y la fuerza centrífuga produce una forma hueca. Además, el material que tiene una densidad alta es enviado hacia la pared externa de la pieza colada, mientras que el material que tiene una densidad más baja que el líquido migra hacia la pared interna.

Cuando se cuela de manera centrífuga una aleación hipereutéctica de Al-Si, la fase β primaria nuclea y crece. La densidad de la fase β (si se supone que es la misma que la del Si puro) es, según el apéndice A, de 2,330 kg/m^3, en comparación con una densidad de casi 2,700 kg/m^3 del aluminio. A medida que las partículas de β primaria se precipitan del líquido, son enviadas a la superficie interna. El resultado es una pieza colada compuesta por el microconstituyente eutéctico

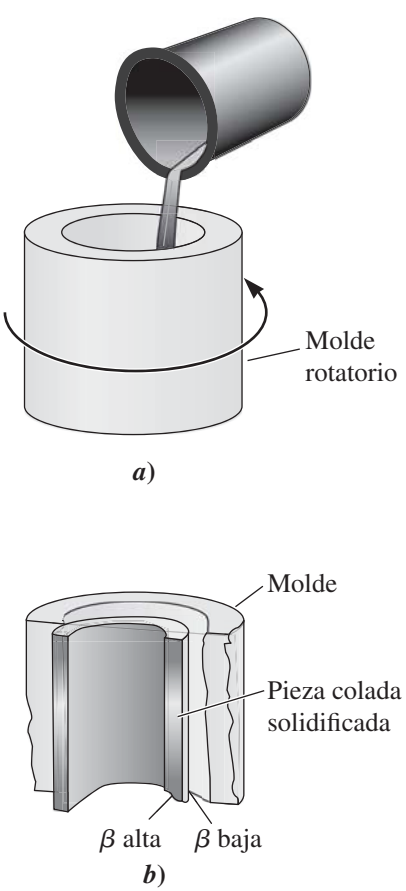


Figura 11-22 Colado centrífugo de una aleación hipereutéctica de Al-Si: *a*) se vierte la aleación líquida en un molde rotatorio y *b*) la pieza colada solidificada es hipereutéctica en el diámetro interno y eutéctica en el diámetro externo (ejemplo 11-7).

(con una ductilidad razonable) en la pared externa y por una composición hipereutéctica, que contiene en la pared interna grandes cantidades de β primaria.

El Al-17% Si es una aleación común para producir componentes para motores. A partir de la figura 11-19, la cantidad total de β primaria que puede formarse se calcula a 578°C, justo por arriba de la temperatura eutéctica:

$$\%\ \text{primaria}\ \beta = \frac{17 - 12.6}{99.83 - 12.6} \times 100 = 5.0\%$$

Aunque sólo se espera que se forme 5.0% de β primaria, la acción centrífuga puede duplicar o triplicar la cantidad de β en la pared interna de la pieza colada.

11-6 Eutécticos y procesamiento de materiales

Muchos procesos de manufactura aprovechan la temperatura de fusión baja asociada con la reacción eutéctica. Las aleaciones de Pb-Sn son la base de una serie de aleaciones que se usan para producir materiales de relleno para soldadura blanda. Por ejemplo, si se desea unir una tubería de cobre, se pueden unir segmentos individuales introduciendo en la unión una aleación eutéctica de Pb-Sn con un punto de fusión bajo [figura 11-23*a*)]. El cobre se calienta justo por encima de la temperatura eutéctica. El cobre calentado funde la aleación de Pb-Sn, la cual es atraída hacia el espacio angosto por la acción capilar. Cuando la aleación de Pb-Sn se enfría y se solidifica, se une el cobre. También deben tomarse en cuenta la posibilidad de corrosión de tales tuberías y la introducción del plomo en el agua.

Diversas aleaciones para colado también se basan en aleaciones eutécticas. El líquido puede fusionarse y vaciarse en un molde a temperaturas bajas, lo cual reduce los costos de energía involucrados en la fundición, lo que minimiza los defectos de la pieza colada (como la porosidad gaseosa)

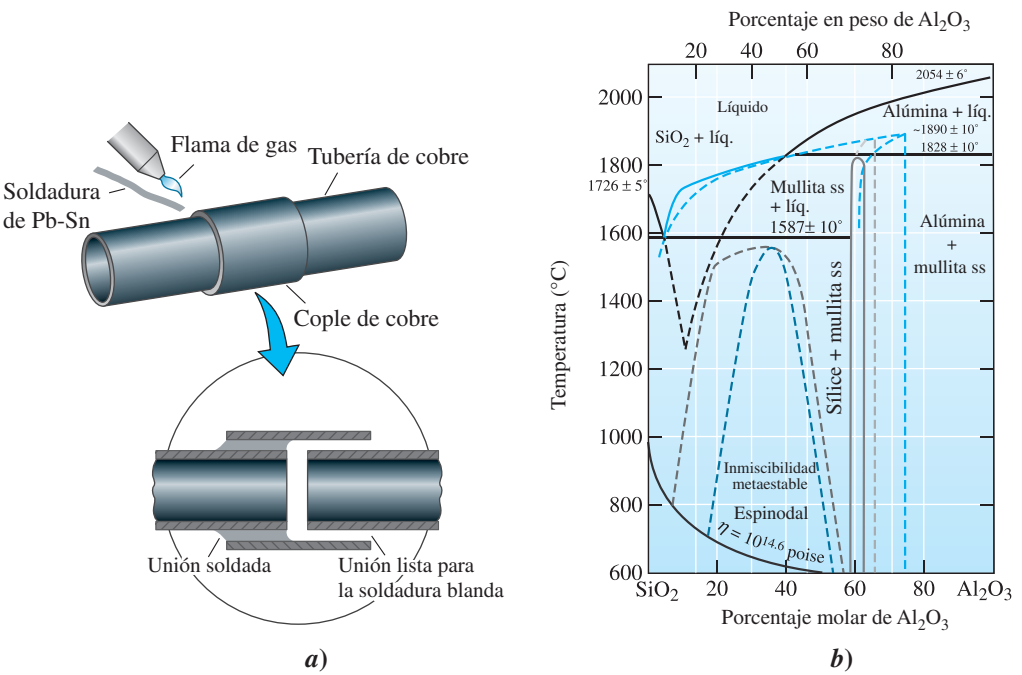


Figura 11-23 *a*) Con frecuencia se emplea una aleación eutéctica de Pb-Sn durante la soldadura blanda para ensamblar piezas. Una fuente de calor, como una flama de gas, calienta las piezas y el material de relleno. El relleno es aspirado en la unión y se solidifica. *b*) Diagrama de fases del Al_2O_3-SiO_2. (*Con base en* Introduction to Phase Equilibria in Ceramics, *de Bergeron, C. G. y Risbud, S. H., American Ceramic Society, Inc., 1984.*)

y previene reacciones entre el metal líquido y el molde. El hierro colado (capítulo 13) y muchas aleaciones de aluminio (capítulo 14) son aleaciones eutécticas.

Aunque la mayor parte de esta explicación se ha centrado en torno a los materiales metálicos, es importante reconocer que los eutécticos también son muy importantes en muchos sistemas cerámicos (capítulo 15). La sílice y la alúmina son los materiales cerámicos que más se emplean. La figura 11-23*b*) muestra el diagrama de fases del sistema $Al_2O_3SiO_2$. Observe el eutéctico a ~1,587°C. Las líneas discontinuas en este diagrama muestran las extensiones metaestables del liquidus y las zonas de miscibilidad metaestables. Como ya se mencionó, la existencia de estas zonas permite fabricar productos tecnológicamente útiles como los vidrios Vycor[MR] y Pyrex®. El vidrio Vycor[MR] se fabrica fundiendo (aproximadamente a 1,500°C) primero la sílice (63%), el óxido de boro (27%), el óxido de sodio (7%) y la alúmina (3%). Después se moldea el vidrio en las formas deseadas. Durante la formación del vidrio, las fases vítreas se separan (debido a la zona de miscibilidad metaestable) en regiones ricas en óxido de boro y en sílice. Las regiones ricas en óxido de boro se disuelven mediante un ácido. El objeto poroso se sinteriza para formar el vidrio Vycor[MR] que contiene 95%pe de sílice, 4% de óxido de boro y 1% de óxido de sodio. Sería muy difícil fabricar un vidrio con gran porcentaje de sílice como este sin recurrir a la técnica descrita arriba. Los vidrios Pyrex® contienen alrededor de 80%pe de sílice, 13% de óxido de boro, 4% de óxido de sodio y 2% de alúmina. Se utilizan ampliamente para fabricar material para laboratorio como vasos de precipitado y productos para el hogar.

11-7 Solidificación sin equilibrio en el sistema eutéctico

Suponga que tiene una aleación, como Pb-15% Sn, que por lo general se solidifica como una aleación de solución sólida. El último líquido se solidifica a casi 230°C, muy por encima de la eutéctica; sin embargo, si la aleación se enfría demasiado rápido, se produce una curva de solidus sin equilibrio (figura 11-24). La fase α primaria continúa creciendo hasta que, justo por encima de 183°C, el líquido

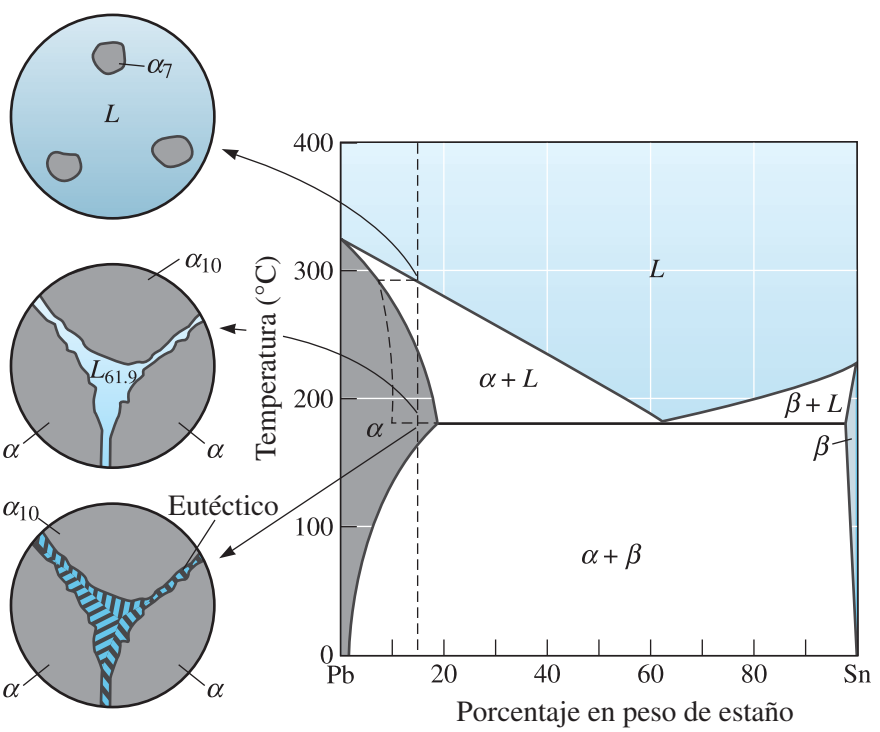


Figura 11-24 Solidificación sin equilibrio y microestructura de una aleación de Pb-15% Sn. Puede formarse un microconstituyente eutéctico sin equilibrio si la solidificación es demasiado rápida.

sin equilibrio restante contiene 61.9% de Sn. Este líquido se transforma en el microconstituyente eutéctico que rodea a la fase α primaria. En las condiciones que se muestran en la figura 11-24, la cantidad de eutéctico sin equilibrio es

$$\%\ \text{eutéctico} = \frac{15 - 10}{61.9 - 10} \times 100 = 9.6\%$$

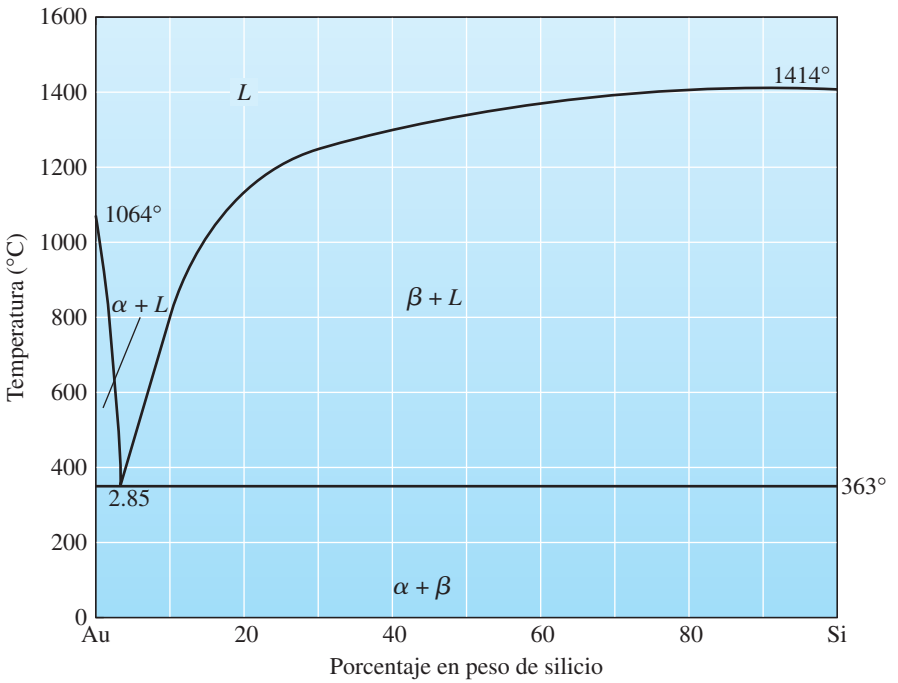
Cuando se trata térmicamente una aleación como la de Pb-15% Sn, se debe mantener la temperatura máxima por debajo de la temperatura eutéctica de 183°C para prevenir la **fragilidad en caliente** o la fundición parcial. Este concepto es muy importante en el proceso de endurecimiento por precipitación, o envejecimiento, de las aleaciones metálicas como las del sistema Al-Cu.

11-8 Nanoalambres y el diagrama de fases eutécticas

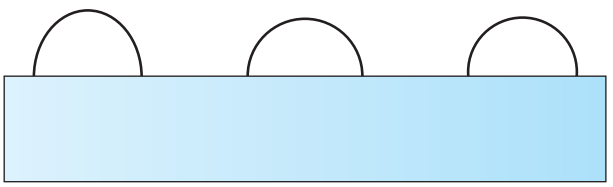
Los **nanoalambres** son cilindros o "alambres" de material con diámetro del orden de 10 a 100 nm. Se ha generado un gran interés tecnológico en los nanoalambres debido a sus propiedades eléctricas, mecánicas, químicas y ópticas. Sus aplicaciones potenciales incluyen sensores biológicos y químicos y conductores eléctricos en dispositivos nanoelectrónicos y electrodos en baterías. Un método común para convertir materiales en nanoalambres es mediante la técnica conocida como crecimiento de vapor-líquido-sólido (VLS). El crecimiento de nanoalambres de silicio puede comprenderse si se observa el diagrama de fases binario oro-silicio que se presenta en la figura 11-25*a*). Observe que no hay una solubilidad mutua entre el oro y el silicio.

En un ejemplo del crecimiento de nanoalambres de silicio por VLS, la primera etapa implica depositar una capa delgada de oro puro en un sustrato. Cuando se calienta el sustrato, el oro se desprende o "se abulta" para formar una serie de nanopartículas de oro en la superficie del sustrato, como se muestra en la figura 11-25*b*). Estas nanopartículas, también conocidas como catalizadores de nanoalambres, actúan como la plantilla para hacer crecer nanoalambres de silicio. El gas silano (SiH_4), el "vapor" del proceso de VLS de crecimiento de nanoalambres de silicio, fluye a través de una cámara que mantiene al sustrato con las nanopartículas de oro. El sustrato se calienta a una temperatura por encima de la temperatura eutéctica del oro-silicio de 363°C, pero por debajo de la temperatura de fusión del oro (1,064°C). El gas silano se descompone con base en $SiH_4 \rightarrow Si + 2H_2$. El silicio que se produce a partir de la descomposición del silano adsorbe las nanopartículas de oro, se difunde en ellas y provoca que comiencen a fundirse (con lo cual forman el "líquido" del crecimiento de VLS). Las nanopartículas de oro se mantienen a una temperatura constante, se incrementa el contenido de silicio y la aleación de oro-silicio entra a una región de dos fases ($\alpha - L$) en el diagrama de fases de oro-silicio.

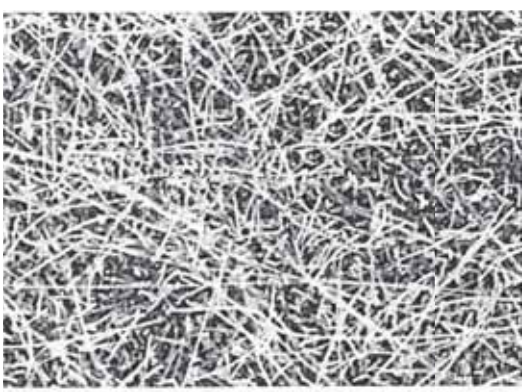
El silicio continúa difundiéndose en las nanopartículas de oro hasta que se funden por completo. Las nanopartículas conservan su forma de bolas casi hemisféricas debido a las consideraciones superficie-energía entre las nanopartículas y el sustrato (piense en las gotas de aceite en una sartén con Teflón®). A medida que aumenta el contenido de silicio debido a su difusión entre las nanopartículas, comienza a formarse una fase sólida, que no es otra cosa que el nanoalambre de silicio. Es silicio puro. El nanoalambre tiene el mismo diámetro que las nanopartículas de oro. La fase líquida que está presente se agrega encima del nanoalambre de silicio a medida que crece hacia arriba del sustrato. El nanoalambre continúa creciendo en longitud mientras se suministra gas silano al sustrato. Cuando se completa el crecimiento del nanoalambre, se reduce la temperatura y la fase sólida encima del nanoalambre se solidifica cuando se enfría a través de la temperatura eutéctica. En la figura 11-25*c*) se muestran los nanoalambres de silicio, mientras que los catalizadores de oro encima de los nanoalambres pueden observarse en la figura 11-25*d*).



a)

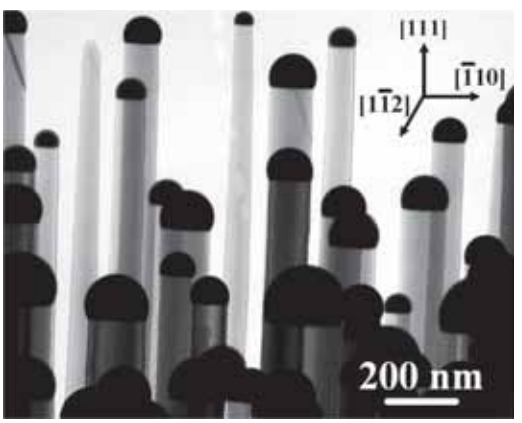


b)



c)

2 μm



d)

Figura 11-25 *a*) Diagrama de fases de Au-Si. (*Basada en* ASM Metal sHandbook, *vol. 8, Metallograhy, Structures and Phase Diagrams, 1973, ASM International, Materials Park, OH 44073-002*.) *b*) Diagrama esquemático de las nanopartículas de Au en el sustrato. *c*) Micrografía electrónica de barrido de los nanoalambres de silicio. (*Cortesía de Wendelin Wright*). *d*) Los catalizadores de oro encima de nanoalambres de silicio son visibles en esta imagen ampliada. [*Figura reimpresa con permiso de S. Kodambaka, J. Tersoff, M. C. Reuter y F. M. Ross, en* Physical Review Letters *96, p. 096105-2 (2006). Copyright 2006 por la American Physical Society.*]

Ejemplo 11-8 *Crecimiento de nanoalambres de silicio*

Considere que a 600°C se colocan nanopartículas de oro en un sustrato de silicio sobre el que fluye gas silano. *a*) Cuando una nanopartícula tiene 1%pe de Si, describa las fases que están presentes en ella, la cantidad relativa de cada fase y la composición de cada una de éstas. Realice las aproximaciones de las composiciones necesarias a partir del diagrama de fases de la figura 11-25*a*). *b*) ¿A qué porcentaje del silicio se funden por completo las nanopartículas? *c*) ¿A qué porcentaje del silicio las nanopartículas fundidas comenzarán a solidificarse de nuevo? *d*) ¿Cuáles son las composiciones finales del nanoalambre y del catalizador solidificado?

SOLUCIÓN

a) La nanopartícula consiste en una fase sólida y una líquida a 1%pe de Si. El sólido es totalmente de Au. Con base en la figura 11-25*a*) el líquido contiene aproximadamente 2.4%p de Si y 97.6% de Au. (El %pe del silicio debe ser menor a 2.85%, con base en el punto eutéctico del diagrama de fases.)

Para determinar las cantidades relativas de cada fase se utiliza la regla de la palanca:

$$\%\ \text{sólido} = \frac{2.4 - 1.0}{2.4 - 0} = 58\% \qquad \%\ \text{líquido} = \frac{1.0 - 0}{2.4 - 0} = 42\%$$

Por lo tanto, la nanopartícula consiste en 58% sólido (100% de Au) y 42% líquido (2.4% de Si y 97.6% de Au).

b) La isla se fundirá por completo cuando el contenido de silicio alcance aproximadamente 2.4%.

c) La isla comenzará a solidificarse de nuevo cuando el contenido de silicio alcance aproximadamente 7%.

d) La fase sólida es totalmente de Si. La fase líquida es de aproximadamente 7% de Si y 97% de Au.

Resumen

- Cuando se fabrica un material que contiene dos o más fases, se produce endurecimiento por dispersión. En los materiales metálicos, el límite entre las fases impide el movimiento de las dislocaciones y mejora la resistencia. La introducción de múltiples fases puede generar entre ellos, otros beneficios, la mejora de la tenacidad a la fractura de las cerámicas y los polímeros.
- En el caso de endurecimiento óptimo por dispersión, en particular en los materiales metálicos, debe formarse un gran número de partículas pequeñas y duras dispersadas de manera discontinua en una matriz blanda y dúctil, pues ello constituye el obstáculo más eficaz contra las dislocaciones. Las partículas redondas de la fase dispersa minimizan las concentraciones de esfuerzos y las propiedades finales de la aleación pueden ser controladas por las cantidades relativas de éstas y la matriz.
- Los compuestos intermetálicos, los cuales por lo general son resistentes pero frágiles, con frecuencia se introducen como fases dispersas.
- Los diagramas de fases de materiales que contienen múltiples fases por lo general presentan una o más reacciones de tres fases.
- La reacción eutéctica permite que el líquido se solidifique como una mezcla de dos fases sólidas. Si se controla el proceso de solidificación, se puede lograr un intervalo amplio de propiedades. Algunos de los factores que pueden controlarse incluyen el tamaño de los granos o los espaciamientos de las ramas de dendritas secundarias de los microconstituyentes primarios, el tamaño

de las colonias del microconstituyente eutéctico, el espaciamiento interlaminar dentro del microconstituyente eutéctico, la microestructura o forma de las fases dentro del microconstituyente eutéctico y la cantidad del microconstituyente eutéctico que se forma.

- Las reacciones eutectoides provocan que un sólido se transforme en una mezcla de otros dos sólidos. Como se muestra en el siguiente capítulo, los tratamientos térmicos diseñados para controlar la reacción eutectoide proporcionan una base excelente para el endurecimiento por dispersión.
- Es posible hacer crecer nanoalambres a partir de sistemas eutécticos a través de un proceso que se conoce como crecimiento de vapor-líquido-sólido (VLS). En un ejemplo del crecimiento de VLS de nanoalambres de silicio, se pasa gas silano sobre catalizadores de oro. El silicio se deposita en el oro, lo que forma un sistema binario. Conforme aumenta la concentración del silicio, los catalizadores se funden, y a medida que la concentración del silicio se incrementa, se forma una fase sólida, que no es otra cosa que el nanoalambre de silicio. El diámetro de los nanoalambres se controla por medio del diámetro del catalizador y la longitud de los nanoalambres por medio del tiempo de crecimiento.

Glosario

Aleación hipereutéctica Composición de una aleación entre la del extremo derecho de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica.

Aleación hipoeutéctica Composición de una aleación entre la del extremo izquierdo de la línea de interconexión que define la reacción eutéctica y la composición eutéctica.

Compuesto intermetálico Compuesto conformado por dos o más metales que tiene su propia composición, estructura y propiedades únicas.

Compuesto intermetálico estequiométrico Fase que se forma por la combinación de dos componentes de un compuesto que tiene una estructura y propiedades diferentes a la de cualquiera de ellos. El compuesto intermetálico estequiométrico muestra una razón fija de los componentes presentes en el compuesto.

Compuesto intermetálico no estequiométrico Fase que se forma por la combinación de dos componentes de un compuesto que tiene una estructura y propiedades diferentes de las que poseen los componentes. El compuesto no estequiométrico muestra una razón variable de los componentes presentes en el compuesto (vea también solución sólida intermedia).

Endurecimiento por dispersión Proceso que incrementa la resistencia de un material pues forma más de una fase. Pueden obtenerse excelentes combinaciones de propiedades si se controlan de manera apropiada el tamaño, la forma, la cantidad y las propiedades individuales de las fases.

Endurecimiento por envejecimiento Mecanismo de endurecimiento que depende de una secuencia de transformaciones de fase de estado sólido en la generación de una dispersión de partículas ultrafinas de una segunda fase. El endurecimiento por envejecimiento es una forma del endurecimiento por dispersión. También se le llama endurecimiento por precipitación (capítulo 12).

Endurecimiento por precipitación Mecanismo de endurecimiento que depende de una secuencia de transformaciones de la fase de estado sólido para generar una dispersión de precipitados ultrafinos de una segunda fase (capítulo 12). Forma de endurecimiento por dispersión, a la que también se le llama endurecimiento por envejecimiento.

Espaciamiento interlaminar Distancia entre el centro de una lámina o placa de una fase y el centro de la lámina o placa adyacente de la misma fase.

Estudio isopletal Procedimiento para determinar las reacciones y cambios microestructurales que se esperan mientras se estudia una composición química específica en un sistema.

Eutéctica Reacción invariante de tres fases en la que una fase líquida se solidifica para producir dos fases sólidas.

Eutectoide Reacción invariante de tres fases en la que una fase sólida se transforma en dos fases solidas distintas.

Fase dispersa Fase sólida que se forma a partir de la fase de la matriz original cuando se excede el límite de solubilidad.

Fragilidad en caliente Fundición del material sin equilibrio con el punto de fusión más bajo que se forma debido a la segregación, aun cuando la temperatura esté por debajo de la temperatura de solidus en equilibrio.

Hiper Prefijo que indica que la composición de una aleación se encuentra entre la composición que define el extremo derecho de la línea de enlace y la composición a la que ocurre la reacción relevante de tres fases.

Hipo Prefijo que indica que la composición de una aleación se encuentra entre la composición que define el extremo izquierdo de la línea de enlace y la composición a la que ocurre la reacción relevante de tres fases.

Interfaz de interfases Límite entre dos fases de una microestructura.

Isopleta Línea en un diagrama de fases que muestra una composición química constante.

Lámina Placa delgada de una fase que se forma durante ciertas reacciones entre tres fases, como la eutéctica o la eutectoide.

Matriz Fase sólida continua de una microestructura compleja.

Microconstituyente Fase o mezcla de fases en una aleación que tiene una apariencia distinta. Con frecuencia, se describe una microestructura en términos de los microconstituyentes en lugar de hacerlo en relación con las fases reales.

Microconstituyente eutéctico Mezcla característica de dos fases formada como resultado de la reacción eutéctica.

Microconstituyente primario Microconstituyente que se forma antes de que comience una reacción entre tres fases. También se le llama microconstituyente proeutéctico.

Modificación Adición de elementos de aleación, que cambia la microestructura del microconstituyente eutéctico en las aleaciones eutécticas.

Monotéctica Reacción de tres fases en la que un líquido se transforma en un sólido y en un segundo líquido durante el enfriamiento.

Nanoalambres Cilindros o "alambres" de material con diámetros de 10 a 100 nm.

Peritéctica Reacción de tres fases en la que un sólido y un líquido se combinan para producir un segundo sólido en el enfriamiento.

Peritectoide Reacción de tres fases en la que dos sólidos se combinan para formar un tercer sólido en el enfriamiento.

Precipitado Fase sólida que se forma a partir de la fase de la matriz original cuando se excede el límite de solubilidad. Con frecuencia se emplea el término precipitado como opuesto a las partículas de la fase dispersa de las aleaciones formadas por el endurecimiento por precipitación o envejecimiento. En la mayoría de los casos, se trata de controlar la formación de las partículas precipitadas de la segunda fase para producir el endurecimiento por dispersión o en endurecimiento por envejecimiento óptimo. (También se le llama fase dispersa.)

Solución sólida intermedia Compuesto intermetálico no estequiométrico que muestra un intervalo de composiciones.

Solvus Curva de solubilidad que, en el diagrama de fases, separa una región de una sola fase sólida de una región de dos fases sólidas.

Zona de miscibilidad Región de un diagrama de fases en la que dos fases, en esencia con la misma estructura, no se mezclan, o no tienen solubilidad entre sí.

Zona de miscibilidad metaestable Zona de miscibilidad que se extiende por debajo del liquidus o existe por completo por debajo de este. Dos líquidos que son inmiscibles continúan existiendo como líquidos y permanecen sin mezclarse. Estos sistemas forman la base de los vidrios Vycor^{MR} y Pyrex®.

Problemas

Sección 11-1 Principios y ejemplos del endurecimiento por dispersión

11-1 ¿Cuáles son los requisitos que deben satisfacer una matriz y un precipitado para que el endurecimiento por dispersión sea eficaz?

Sección 11-2 Compuestos intermetálicos

11-2 ¿Qué es un compuesto intermetálico? ¿En qué difiere de otros compuestos? Por ejemplo, además de la diferencia obvia en composición, ¿en qué difiere el TiAl del Al_2O_3?

11-3 Explique las dos maneras en las que pueden usarse los compuestos intermetálicos.

11-4 ¿Cuáles son algunos de los problemas principales que surgen cuando se utilizan los intermetálicos para aplicaciones a temperaturas altas?

11-5 En la figura 11-2, ¿qué porcentaje en peso de rodio permitirá la fase pura γ de mayor temperatura?

Sección 11-3 Diagramas de fases que contienen reacciones de tres fases

11-6 Defina los términos reacciones eutécticas, eutectoides, peritécticas, peritectoides y monotécticas.

11-7 ¿Qué es una reacción invariante? Demuestre que en un sistema de dos componentes el número de grados de libertad de una reacción invariante es cero.

11-8 Muchos diagramas de fases binarios tienen dos escalas en la abscisa (eje horizontal), una para el porcentaje en peso y otra para el porcentaje atómico de uno de los elementos. ¿Por qué nos interesan ambas escalas?

11-9 ¿Bajo qué circunstancias el total de la composición es igual a la composición o composiciones de la fase? ¿Bajo qué condiciones difiere?

11-10 ¿Por qué se etiquetan sólo las regiones de una fase en un diagrama de fases binario?

11-11 En la figura 11-26 se muestra un diagrama de fases hipotético.

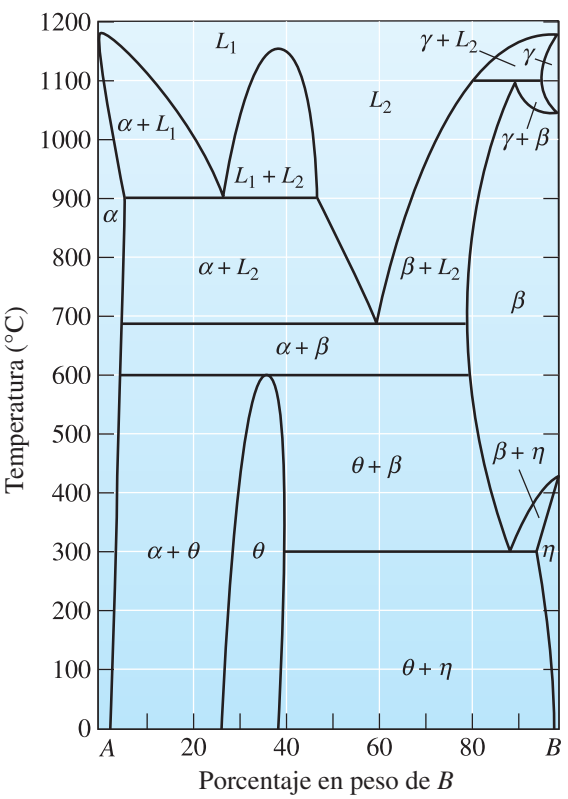


Figura 11-26 Diagrama de fases hipotético (problema 11-11).

a) ¿Hay compuestos intermetálicos presentes? Si los hay, identifíquelos y determine si son estequiométricos o no lo son.

b) Identifique las soluciones sólidas presentes en el sistema. ¿Este material es alotrópico A o B? Explique su respuesta.

c) Identifique las reacciones de tres fases escribiendo la temperatura, la reacción en forma de ecuación, la composición de cada fase den la reacción y el nombre de la reacción.

11-12 Considere la información de la figura 11-5. Escriba la reacción de una aleación equitativa de A y B que inicia a 1400°C cuando el crisol se enfría a temperatura ambiente (25°C).

11-13 La figura 11-27 muestra el diagrama de fases de Cu-Zn.

a) ¿Hay compuestos intermetálicos presentes? Si los hay, identifíquelos y determine si son estequiométricos o no estequiométricos.

b) Identifique las soluciones sólidas presentes en el sistema.

c) Identifique las reacciones de tres fases escribiendo la temperatura, la reacción en forma de ecuación, la composición de cada fase en la reacción y el nombre de la reacción.

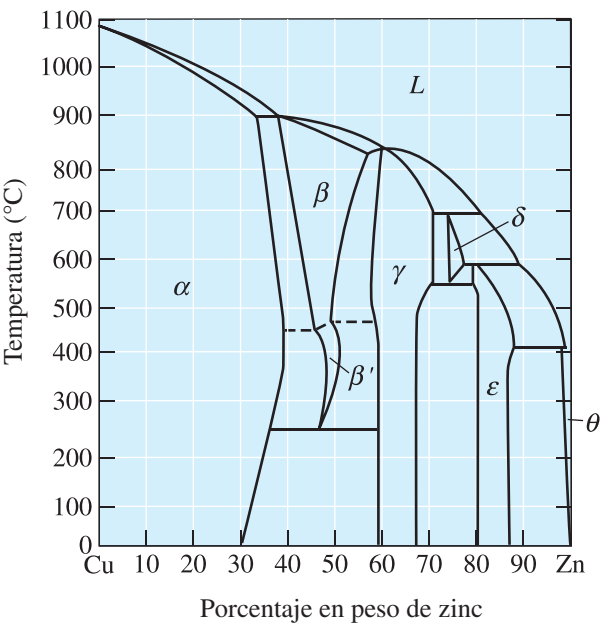


Figura 11-27 Diagrama de fases de cobre-zinc (problema 11-13)

11-14 La figura 11-28 muestra el diagrama de fases de Al-Li.

a) ¿Hay compuestos intermetálicos presentes? Si los hay, identifíquelos y determine si son

estequiométricos o no estequiométricos. Determine la fórmula de cada compuesto.

b) Identifique las reacciones de tres fases escribiendo la temperatura, la reacción en forma de ecuación, la composición de cada fase de la reacción y el nombre de la reacción.

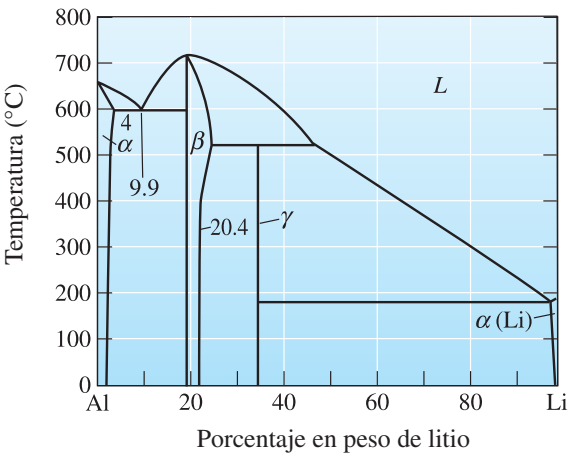


Figura 11-28 Diagrama de fases de aluminio-litio (problemas 11-14 y 11-36).

11-15 Se encuentra un compuesto intermetálico de 38%pe de Sn en el diagrama de fases de Cu-Sn. Determine la fórmula del compuesto.

11-16 Se encuentra un compuesto intermetálico de 10%pe de Si en el diagrama de fases de Cu-Si. Determine la fórmula del compuesto.

Sección 11-4 Diagrama de fases eutéctico

11-17 Utilice la regla de fases de Gibbs para determinar el número de grados de libertad en cada región del diagrama de fases de la figura 11-6.

11-18 Considere una aleación de Pb-15% Sn. Durante la solidificación, determine

a) la composición del primer sólido que se formará;

b) la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus, la temperatura de solvus y el intervalo de solidificación de la aleación;

c) las cantidades y composiciones de cada fase a 260°C;

d) las cantidades y composiciones de cada fase a 183°C, y

e) las cantidades y composiciones de cada fase a 25°C.

11-19 Considere una aleación de Al-12% Mg (figura 11-29). Durante la solidificación, determine

a) la composición del primer sólido a formarse;

b) la temperatura de liquidus, la temperatura de solidus, la temperatura de solvus y el intervalo de solidificación de la aleación;

c) las cantidades y composiciones de cada fase a 525°C;

d) las cantidades y composiciones de cada fase a 450°C, y

e) las cantidades y composiciones de cada fase a 25°C.

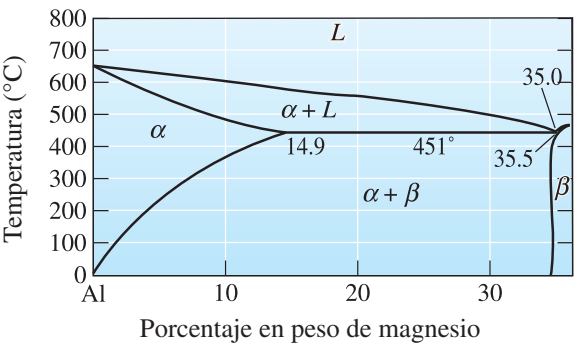


Figura 11-29 Parte del diagrama de fases de aluminio-magnesio (problemas 11-19 y 11-37).

11-20 Considere una aleación de Pb-35% Sn. Determine

a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;

b) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación;

c) las cantidades y composiciones de cada fase a 184°C;

d) las cantidades y composiciones de cada fase a 182°C;

e) las cantidades y composiciones de cada microconstituyente a 182°C, y

f) las cantidades y composiciones de cada fase a 25°C.

11-21 Considere una aleación de Pb-70% Sn. Determine

a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;

b) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación;

c) las cantidades y composiciones de cada fase a 184°C;

d) las cantidades y composiciones de cada fase a 182°C;

e) las cantidades y composiciones de cada microconstituyente a 182°C, y

f) las cantidades y composiciones de cada fase a 25°C.

11-22 *a*) Dibuje un diagrama de fases eutéctico común con los componentes A y B que tienen puntos

de fusión similares. B es mucho más soluble en A (máxima = 15%) que lo que es A en B (máxima = 5%) y la composición eutéctica ocurre cerca de 40% B. La temperatura eutéctica es 2/3 del punto de fusión. Etiquete los ejes del diagrama y todas las fases. Utilice α y β para indicar las fases sólidas. *b*) En una composición general de 60% B, enumere la secuencia de las fases que se suceden a medida que el líquido se enfría lentamente a temperatura ambiente.

11-23 En la figura 11-30 se muestra el diagrama de fases de cobre-plata. El cobre tiene un punto de fusión mayor que la plata. Refiérase a la fase sólida rica en plata como gama (γ) y a la fase sólida rica en cobre como delta (δ). Identifique al líquido como *L*.

a) En una composición total de 60% B (40% A) a una temperatura de 800°C, ¿cuáles son las composiciones y cantidades de las fases presentes?

b) En una composición total de 30% B (70% A) a una temperatura de 1000°C, ¿cuáles son las composiciones y cantidades de las fases presentes?

c) Dibuje un diagrama esquemático que ilustre la microestructura final de un material con una composición de 50% B (50% A) enfriado a 200°C desde el estado líquido. Etiquete cada fase presente.

11-24 Determine las fases presentes y las composiciones de cada fase de Cu %p 55 Ag a 600°C. (Remítase al problema 11-23 y a la figura 11-30.)

11-25 Determine las fases presentes y las composiciones de cada fase de Cu % p 85 Ag a 800°C. (Remítase al problema 11-23 y a la figura 11-30.)

11-26 Calcule el porcentaje total de β y el porcentaje del microconstituyente eutéctico a temperatura ambiente de las siguientes aleaciones de plomo-estaño: 10% de Sn, 20% de Sn, 50% de Sn, 60% de Sn, 80% de Sn y 95% de Sn. Con base en la figura 11-18, grafique la resistencia de las aleaciones en función de los porcentajes de β y del eutéctico y explique sus gráficas.

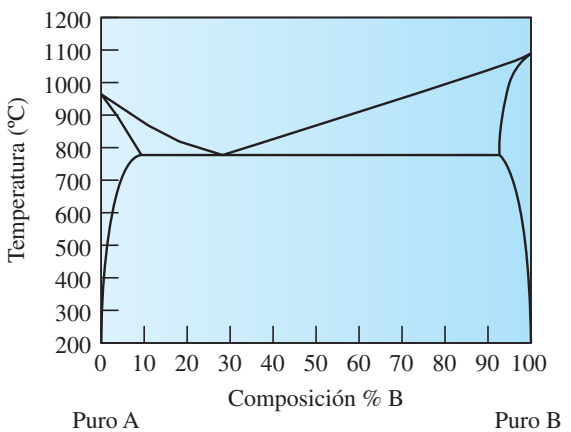


Figure 11-30 Diagrama de fase de los elementos A y B (para el problema 11-23).

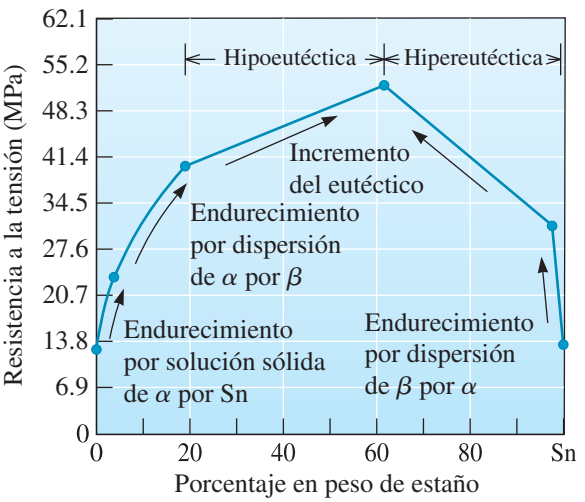


Figura 11-18 Efecto de la composición y del mecanismo de endurecimiento sobre la resistencia a la tensión de las aleaciones de plomo-estaño. (Repetida para el problema 11-26.)

11-27 Considere el diagrama de fases de Al-Si. ¿Cuáles son los porcentajes de la fase α y el líquido en una aleación de Al % p 5 So a 620°C, 600°C y 578°C? ¿Cuáles son los porcentajes de las fases α y β en esta aleación a 576°C y 550°C? Vea la figura 11-19.

11-28 ¿Qué fase(s) está(n) presente(s) en el eutéctico del diagrama de fases Al-Si? Haga un análisis químico de cada fase (vea la figura 11-19.)

11-29 Se ha analizado la fase primaria o constituyente primario. ¿Por qué existiría interés en el porcentaje de la fase primaria en el sistema de aleación de Al-Si?

11-30 Considere una aleación de Al-4% Si (figura 11-19). Determine

a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;

b) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación;

c) las cantidades y composiciones de cada fase a 578°C;

d) las cantidades y composiciones de cada fase a 576°C, las cantidades y composiciones de cada microconstituyente a 576°C, y

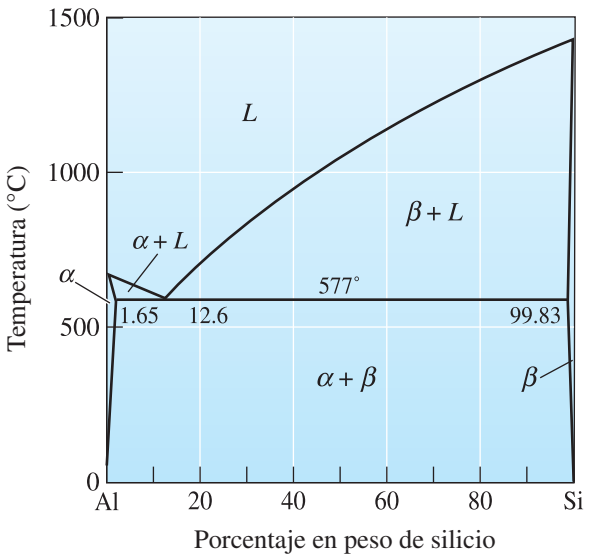


Figura 11-19 Diagrama de fases aluminio-silicio. (Repetida para los problemas 11-27, 11-28, 11-30, 11-31, 11-33, 11-35 y 11-40.)

e) las cantidades y composiciones de cada fase a 25°C.

11-31 Considere una aleación de Al-25% Si (figura 11-19). Determine

a) si la aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica;
b) la composición del primer sólido que se formará durante la solidificación;
c) las cantidades y composiciones de cada fase a 578°C;
d) las cantidades y composiciones de cada fase a 576°C;
e) las cantidades y composiciones de cada microconstituyente a 576°C, y
f) las cantidades y composiciones de cada fase a 25°C.

11-32 Una aleación de Pb-Sn contiene 45% α y 55% β a 100°C. Determine la composición de la aleación. ¿La aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica?

11-33 Una aleación de Al-Si contiene 85% de α y 15% de β a 500°C. Determine la composición de la aleación. ¿La aleación es hipoeutéctica o hipereutéctica? (vea la figura 11-19).

11-34 Una aleación de Pb-Sn contiene 23% de α primaria y 77% del microconstituyente eutéctico inmediatamente después de que se ha completado la reacción eutéctica. Determine la composición de la aleación.

11-35 Una aleación de Al-Si contiene 15% de β primaria y 85% del microconstituyente eutéctico inmediatamente después de que se ha completado la reacción eutéctica. Determine la composición de la aleación. (Vea la figura 11-9.)

11-36 La observación de una microestructura muestra que hay 28% eutéctico y 72% β primaria en una aleación de Al-Li (figura 11-28). Determine la composición de la aleación y si es hipoeutéctica o hipereutéctica.

11-37 Escriba la reacción eutéctica que ocurre, incluyendo las composiciones de las tres fases en equilibrio, y calcule la cantidad de α y β en el microconstituyente eutéctico en el sistema Mg-Al (figura 11-29).

11-38 Calcule la cantidad total de α y β y la cantidad de cada microconstituyente en una aleación de Pb-50% Sn a 182°C. ¿Qué fracción del total de α en la aleación está contenida en el microconstituyente eutéctico?

11-39 La figura 11-31 muestra una curva de enfriamiento de una aleación de Pb-Sn. Determine

a) la temperatura del vertido;
b) el sobrecalentamiento;
c) la temperatura de liquidus;
d) la temperatura eutéctica;
e) el intervalo de solidificación;
f) el tiempo de solidificación local;
g) el tiempo de solidificación total, y
h) la composición de la aleación.

11-40 La figura 11-32 muestra una curva de enfriamiento de una aleación de Al-Si y la figura 11-19 muestra

a) la temperatura del vertido;
b) el sobrecalentamiento;
c) la temperatura de liquidus;
d) la temperatura eutéctica;
e) el intervalo de solidificación;

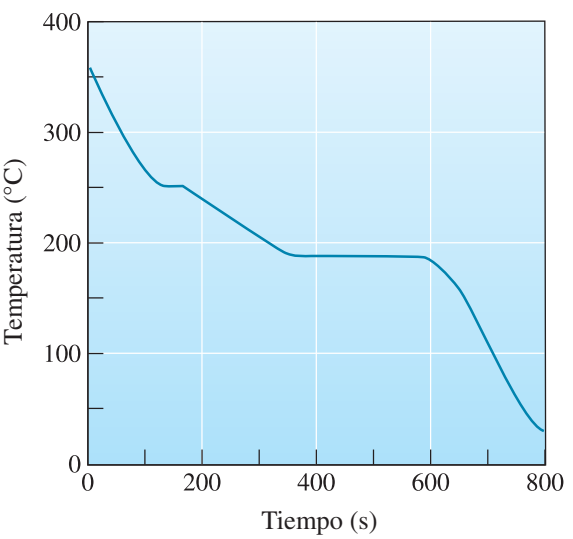


Figura 11-31 Curva de enfriamiento de la aleación Pb-Sn (problema 11-39).

f) el tiempo de solidificación local;
g) el tiempo de solidificación total, y
h) la composición de la aleación.

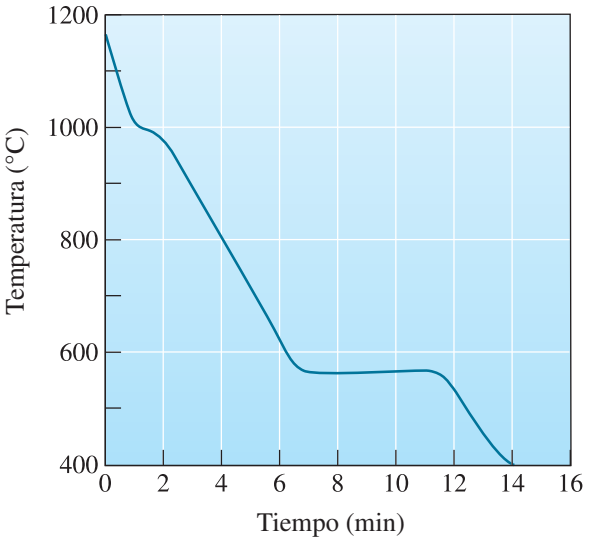


Figura 11-32 Curva de enfriamiento de una aleación de Al-Si (problema 11-40).

11-41 Trace las curvas de enfriamiento esperadas, entre ellas las temperaturas apropiadas, de las siguientes aleaciones de Al-Si:
a) Al-4% Si;
b) Al-12.6% Si;
c) Al-25% Si, y
d) Al-65% Si.

11-42 Se obtienen curvas de enfriamiento a partir de una serie de aleaciones de Cu-Ag (figura 11-33). Utilice esta información para producir el diagrama de fases de Cu-Ag. La solubilidad máxima de Ag en Cu es de 7.9% y la solubilidad máxima de Cu en Ag es de 8.8%. Las solubilidades a temperatura ambiente son casi cero.

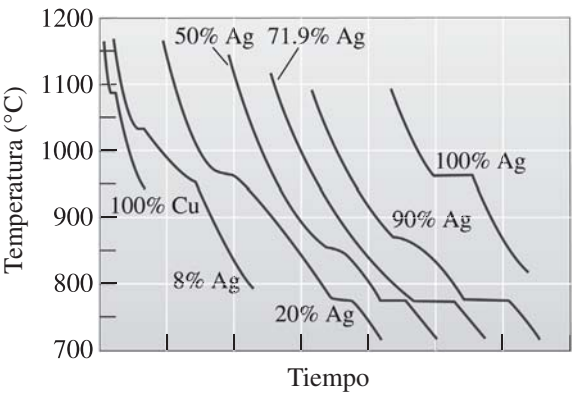


Figura 11-33 Curvas de enfriamiento de una serie de aleaciones de Cu-Ag (problema 11-42).

Sección 11-5 Resistencia de las aleaciones eutécticas

11-43 En relación con las aleaciones eutécticas, ¿qué significa el término "modificación"? ¿Cómo ayuda a las propiedades de la aleación?

11-44 En el sistema Pb-Sn, explique por qué la resistencia a la tensión es máxima en la composición eutéctica.

11-45 ¿La forma de la fase proeutéctica tiene algún efecto sobre la resistencia de las aleaciones eutécticas? Explique por qué.

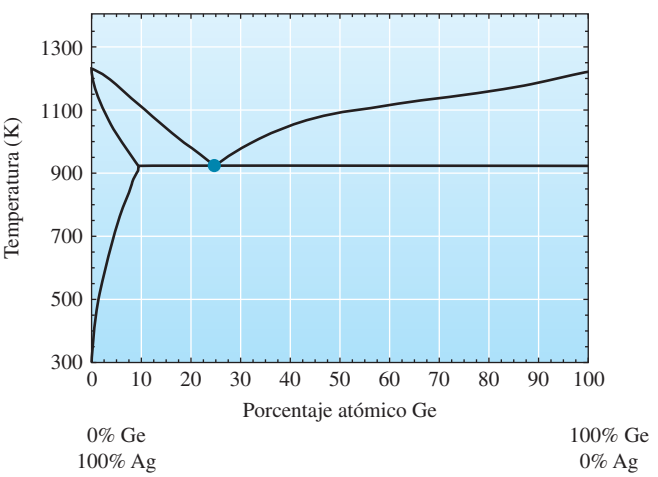


Figura 11-34 Diagrama de fases de plata-germanio (problema 11-46).

11-46 En la figura 11-34 se muestra el diagrama de fases binario de un sistema de plata y germanio.
- *a*) Trace el diagrama de fases y etiquete las fases presentes en cada región del diagrama. Indique α como la fase sólida rica en Ag y β como la fase sólida rica en Ge. Utilice L para indicar la fase líquida.
- *b*) En una composición total de 80% Ge (20% Ag) a una temperatura de 700 K, ¿cuáles son las composiciones y cantidades de las fases presentes?
- *c*) ¿Cuál es la transformación de las fases que ocurre en la solidificación de la fusión al punto marcado con un círculo? ¿Cuál es el nombre especial dado a esta transformación?
- *d*) Dibuje un diagrama esquemático que ilustre la microestructura final de 15% Ge (85% Ag) enfriada lentamente a 300 K desde el estado líquido.
- *e*) Considere dos muestras de tensión a temperatura ambiente. Una es Ag pura y una es Ag con 2% de Ge. ¿Cuál muestra es más resistente?

11-47 En la figura 11-30 se muestra un diagrama de fases de cobre-plata. El cobre tiene un punto de fusión más alto que la plata.
- *a*) ¿El cobre es el elemento A o el elemento B etiquetados en el diagrama de fases?
- *b*) Dibuje de manera esquemática el diagrama de fases y etiquete todas las fases presentes en cada región (de una sola fase y de dos fases) del diagrama de fases escribiéndolas de manera directa en su representación. Indique la fase sólida rica en plata como gamma (γ) y la fase sólida rica en cobre como delta (δ). Indique el líquido como L.
- *c*) A 600°C, la solución sólida del elemento A en el elemento B es más resistente que la solución sólida del elemento B en el elemento A. Suponga condiciones de procesamiento similares. ¿Es probable que un material enfriado de líquido a 600°C con una composición de 90% A y 10% B sea más resistente o más débil que un material con la composición eutéctica? Explique su respuesta.
- *d*) Al efectuar una prueba mecánica, sus resultados indican que su supuesto de condiciones de procesamiento similares en el inciso *c*) era incorrecta y que el material que había supuesto más resistente es el más débil. Proporcione un ejemplo de una condición de procesamiento y una descripción de la microestructura asociada que pudieran haber generado esta discrepancia.

Sección 11-6 Eutécticos y procesamiento de materiales

11-48 Explique por qué se emplean aleaciones de Pb-Sn para realizar la soldadura blanda.

11-49 Los refractarios que se utilizan para fabricar acero incluyen ladrillos de sílice que contienen niveles muy pequeños de alúmina (Al_2O_3). En este sistema, la temperatura eutéctica es de alrededor de 1587°C. La sílice se funde a alrededor de 1725°C. Explique qué le sucederá a la capacidad de soporte de carga de los ladrillos si se incorpora una cantidad pequeña de alúmina a los ladrillos.

11-50 El diagrama de fases de Fe-Fe_3C exhibe un eutéctico cerca de la composición que se utiliza para los hierros colados. Explique por qué es útil que las aleaciones ferrosas que se utilizan para colar piezas tengan un punto eutéctico.

Sección 11-7 Solidificación sin equilibrio en el sistema eutéctico

11-51 ¿Qué es fragilidad en caliente? ¿Cómo afecta a la temperatura a la que pueden usarse las aleaciones eutécticas?

Sección 11-8 Nanoalambres y el diagrama de fases eutéctico

11-52 Explique el mecanismo de vapor-líquido-sólido del crecimiento de nanoalambres.

Problemas de diseño

11-53 Diseñe un método de procesamiento que permita que una aleación de Pb-15% Sn se solidifique en condiciones sin equilibrio para que pueda ser trabajada en caliente.

11-54 Diseñe un proceso de adhesión por difusión eutéctica para unir aluminio con silicio. Describa los cambios en la microestructura de la interfase durante el proceso de adhesión.

11-55 Diseñe una aleación de soldadura fuerte de Al-Si y un proceso que una de manera exitosa una aleación de Al-Mn que tiene una temperatura de liquidus de 659°C y una temperatura de solidus de 656°C. La soldadura fuerte, como la blanda, involucra la introducción de un metal de relleno líquido en una unión sin fundir los metales que se desea unir.

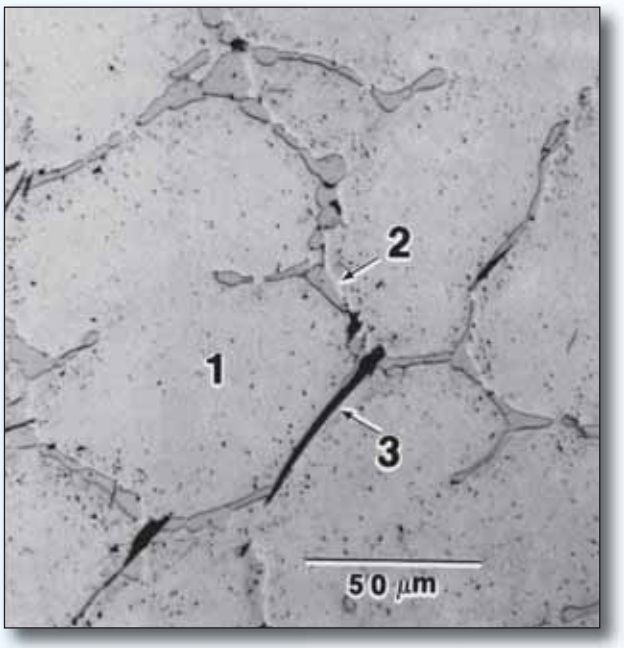
Problemas por computadora

11-56 Edite un programa de cómputo que le asista en la resolución de problemas como los que se

presentan en los ejemplos 11-2 u 11-3. La entrada será, por ejemplo, la composición en volumen de la aleación, la masa de la aleación y las masas atómicas de los elementos (o compuestos) que conforman el sistema binario. El programa debe pedirle al usuario que proporcione la temperatura, el número y la composición de las fases. Asimismo, debe darle al usuario las salidas de las fracciones de las fases presentes y las masas totales de las fases, al igual que la masa de cada elemento en las diferentes fases. Comience con un programa que le provea una solución para el ejemplo 11-3 y después extiéndalo al ejemplo 11-4.

Problemas Knovel[MR]

K11-1 Encuentre un diagrama de fases de hierro-titanio e identifique las temperaturas y las composiciones de la aleación binaria de los puntos de las tres fases de todas las reacciones eutécticas.



El 17 de diciembre de 1903, los hermanos Wright volaron el primer avión controlable. El histórico primer vuelo duró sólo 12 segundos y cubrió 36.5 m, pero cambió al mundo para siempre. (*Topical Press Agency/Hulton Archive/Getty Images*.) También se muestra la micrografía de la aleación que se usó para construir el avión de los hermanos Wright. (*Cortesía del doctor Frank Gayle, NIST*.) ¡Lo que no se sabía en ese entonces era que el motor de aleación de aluminio que usaron se endureció de manera inadvertida por precipitación!

CAPÍTULO

12

Endurecimiento por dispersión mediante transformaciones de fase y tratamiento térmico

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Quién inventó y voló en el primer avión controlable?*
- *¿En qué forma los ingenieros refuerzan las aleaciones de aluminio que se usan en los aviones?*
- *¿Si las aleaciones recuerdan su forma?*
- *¿Por qué algunos aceros se endurecen de manera notable al templarlos cuando están a alta temperatura?*
- *¿Qué aleaciones se usan para fabricar frenos de ortodoncia?*
- *¿Si sería posible incrementar la solidez y la resistencia contra abolladuras de láminas de acero después de fabricado el chasis de un automóvil?*
- *¿Qué son los materiales inteligentes?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Desarrollar una expresión que describa el cambio total en energía libre durante una transformación de fase de estado sólido y la cinética de la formación de núcleos y el crecimiento que ocurre en este proceso.
- Diseñar un tratamiento de endurecimiento por envejecimiento para una aleación apropiada.
- Dibujar un diagrama de fases de acero bajo en carbono entre el hierro puro y la cementita (Fe_3C).
- Predecir las propiedades mecánicas de los aceros hipoeutectoides, eutectoides e hipereutectoides.
- Explicar cómo se produce la martensita y describir sus estructuras y propiedades.
- Exponer las relaciones que existen entre el procesamiento, la composición, las tasas de templado y el recocimiento para controlar la microestructura de un material.

En el capítulo 11 se estudió con detalle la forma en que las partículas de segunda fase pueden incrementar la resistencia de los materiales metálicos. También se vio cómo se preparan los materiales endurecidos por dispersión y qué vías son posibles para la formación de segundas fases durante la solidificación de aleaciones, en especial aleaciones eutécticas. En este capítulo se estudia con más profundidad el endurecimiento por dispersión al describir una amplia variedad de procesos de transformación de estado sólido, incluidos el endurecimiento por precipitación o envejecimiento y la reacción eutectoide. También se examina la forma en que las transformaciones de fase fuera de equilibrio, en particular la reacción martensítica, pueden ser mecanismos para el endurecimiento.

Cuando estudie estos mecanismos de endurecimiento, recuerde las características que producen el endurecimiento más deseable por dispersión, como se vio en el capítulo 11:

- La matriz debe ser relativamente blanda y dúctil y el precipitado, o segunda fase, debe ser fuerte;
- el precipitado debe ser redondo y discontinuo;
- las partículas de segunda fase deben ser pequeñas y numerosas, y
- en general, cuanto más precipitado haya, más fuerte será la aleación.

Al igual que en el capítulo 11, el enfoque se centrará en el modo en que estas reacciones influyen en la resistencia de los materiales y en la forma en que los tratamientos térmicos pueden influir en otras propiedades. Se inicia con la formación de núcleos y crecimiento de partículas de segunda fase en transformaciones de fase de estado sólido.

12-1 Formación de núcleos y crecimiento en reacciones en estado sólido

En el capítulo 9 se analizó la formación de núcleos de un sólido a partir de una fusión. También se estudiaron los conceptos de supersaturación, subenfriamiento y nucleación homogénea y heterogénea. A continuación se verá la forma en que estos conceptos se aplican a transformaciones de fase de estado sólido, como la reacción eutectoide. Para que un precipitado de fase β se forme a partir de una matriz sólida de fase α, deben ocurrir tanto la formación de núcleos como el crecimiento. El cambio total en energía libre necesario para la formación de núcleos de un precipitado esférico sólido de radio r de esta matriz es

$$\Delta G = \tfrac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_{v(\alpha\rightarrow\beta)} + 4\pi r^2 \sigma_{\alpha\beta} + \tfrac{4}{3}\pi r^3 \varepsilon \qquad (12\text{-}1)$$

Los primeros dos términos incluyen el cambio de energía libre por unidad de volumen (ΔG_v) y el cambio de energía necesario para crear el área unitaria de la interfase $\alpha - \beta$ ($\sigma_{\alpha\beta}$), igual que en una solidificación (ecuación 9-1). El tercer término toma en cuenta la **energía de deformación** por unidad de volumen (ε), la energía indispensable para que un precipitado se ajuste en la matriz circundante durante la formación de núcleos y crecimiento del precipitado. El precipitado no ocupa el mismo volumen que se desplaza, de modo que se requiere de energía adicional para acomodarlo en la matriz.

Formación de núcleos o nucleación

Al igual que en la solidificación, la formación de núcleos ocurre con más facilidad en superficies ya presentes en la estructura, con lo cual se reduce al mínimo el término de energía superficial. De este modo, los precipitados que se forman heterogéneamente lo hacen con mayor facilidad en límites de granos y otros defectos.

Crecimiento

Por lo general, el crecimiento de precipitados se lleva a cabo por difusión del largo alcance y redistribución de átomos. Los átomos en difusión deben desprenderse de sus lugares originales (quizás en puntos de red en una solución sólida), moverse por el material circundante a los núcleos e incorporarse en la estructura cristalina del precipitado. En algunos casos, los átomos

en difusión podrían estar tan apretadamente unidos dentro de una fase que el proceso de desprendimiento limita la rapidez de crecimiento. En otros casos, unir los átomos en difusión al precipitado, quizá por la deformación de red, limita el crecimiento. En ocasiones, este resultado provoca la formación de precipitados que tienen una relación especial con la estructura de la matriz que minimiza la deformación. Sin embargo, casi siempre el factor de control es el paso de difusión.

Cinética

La rapidez total, o *cinética*, del proceso de transformación depende de la formación de núcleos y del crecimiento. Si están presentes más núcleos a una temperatura específica, el crecimiento se lleva a cabo desde un gran número de lugares y la transformación de fase se completa en un periodo más corto. A temperaturas más altas, el coeficiente de difusión es mayor, las velocidades de crecimiento son mayores y de nuevo se espera que la transformación se complete en un tiempo más corto, suponiendo un número igual de núcleos.

La velocidad de transformación está dada por la ecuación de Avrami (ecuación 12-2), con la fracción transformada, f, relacionada con el tiempo, t, por

$$F = 1 - \exp(-ct^n) \tag{12-2}$$

donde c y n son constantes en el caso de una temperatura específica. Esta **relación de Avrami**, que se muestra en la figura 12-1, produce una curva sigmoide en forma de S, la cual puede describir casi todas las transformaciones de fase de estado sólido. Un tiempo de incubación, t_0, durante el cual no ocurre una transformación observable, es el tiempo necesario para que se formen núcleos. Inicialmente, la transformación ocurre con lentitud a medida que se forman núcleos.

La incubación es seguida por un rápido crecimiento cuando los átomos se difunden en el precipitado en crecimiento. Cerca del final de la transformación, la velocidad se reduce cuando se agota la fuente de átomos disponibles para difundirse en el precipitado de crecimiento. La transformación está 50% completa en el tiempo τ. Es frecuente que la velocidad de transformación esté dada por el recíproco de τ

$$\text{Velocidad} = 1/\tau \tag{12-3}$$

Efecto de la temperatura

En numerosas transformaciones de fase, el material se subenfría debajo de la temperatura a la que éstas ocurren bajo condiciones de equilibrio. Puesto que la formación de núcleos y el crecimiento dependen de la temperatura, la velocidad de transformación de fase depende del subenfriamiento (ΔT). La rapidez de formación de núcleos es baja en el caso de subenfriamientos de pequeña magnitud (dado que la fuerza termodinámica motriz es baja), y aumenta en el de subenfriamientos mayores cuando se incrementa la fuerza termodinámica motriz, al menos hasta cierto punto (porque la difusión se vuelve más lenta a medida que disminuye la temperatura). Al mismo tiempo, la rapidez de crecimiento de la nueva fase disminuye de forma continua (debido a una difusión más lenta), cuando aumenta el subenfriamiento. La rapidez de crecimiento sigue la *relación de Arrhenius* (recuerde la ecuación 5-1):

$$\text{Rapidez de crecimiento} = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \tag{12-4}$$

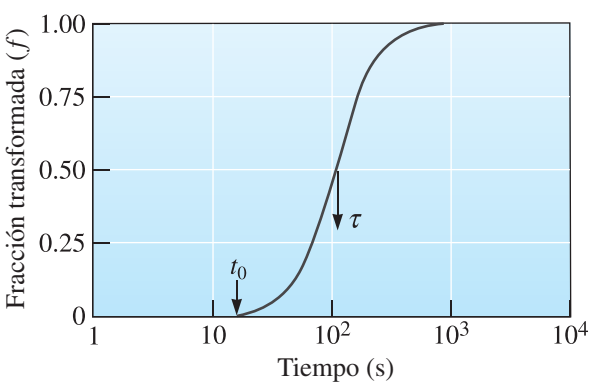


Figura 12-1 Curva sigmoide que muestra la velocidad de transformación de hierro CCCa a una temperatura constante. También se muestran el tiempo de incubación t_0 y el tiempo τ para la transformación a 50%.

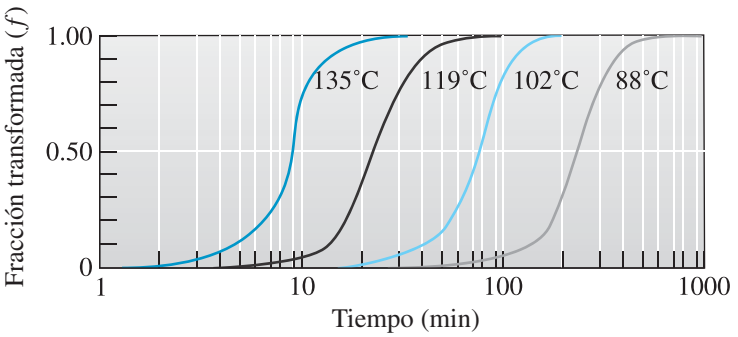


Figura 12-2 Efecto de la temperatura en la recristalización de cobre trabajado en frío.

donde Q es la energía de activación (en este caso, para la transformación de fase), R la constante de los gases, T la temperatura y A una constante.

La figura 12-2 muestra curvas sigmoides a diferentes temperaturas de recristalización de cobre; cuando se incrementa la temperatura, *aumenta* la velocidad de recristalización del cobre.

A cualquier temperatura específica, la velocidad total de transformación es el producto de las velocidades de formación de núcleos y de crecimiento. En la figura 12-3*a*) se ilustra el efecto combinado de las velocidades de formación de núcleos y crecimiento. Puede observarse una rapidez máxima de transformación ante un subenfriamiento crítico. El tiempo necesario para la transformación está relacionado inversamente con la rapidez de ésta; la figura 12-3*b*) describe el tiempo (en una escala logarítmica) indispensable para la transformación. Esta curva en forma de C es común en el caso de numerosas transformaciones de metales, cerámicas, vidrios y polímeros. Observe que el tiempo preciso a una temperatura correspondiente para la transformación de fase de equilibrio sería ∞ (es decir, la transformación de fase no ocurrirá). Esto se debe a que no hay subenfriamiento y, por lo tanto, la velocidad de nucleación homogénea es cero.

En algunos procesos, como en la recristalización de un metal trabajado en frío, se encuentra que la velocidad de transformación disminuye de forma continua con la reducción de la temperatura. En este caso, con facilidad ocurre una formación de núcleos y predomina la difusión o crecimiento (es decir, el crecimiento es el paso limitante de la velocidad de la transformación). El siguiente ejemplo ilustra la forma en que la energía de activación de una transformación de fase de estado sólido, como una recristalización, puede obtenerse a partir de datos relacionados con la cinética del proceso.

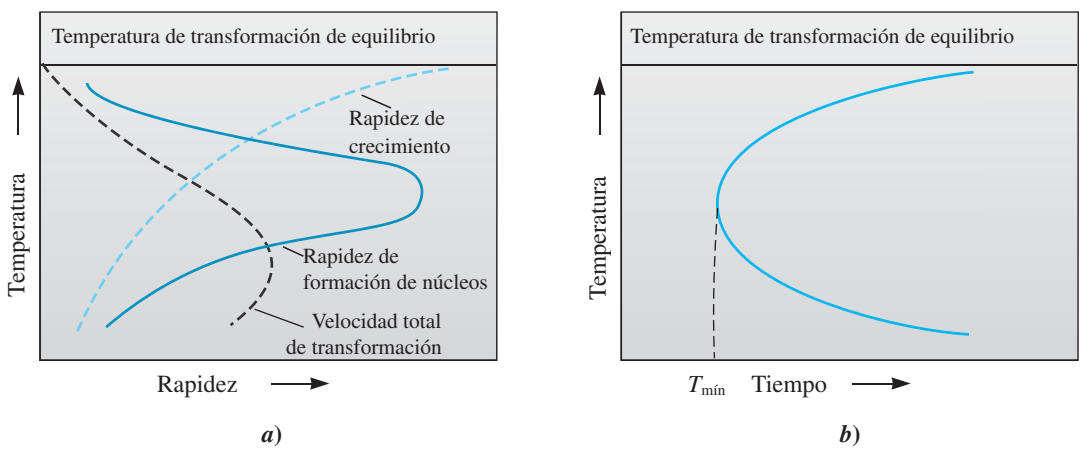


Figura 12-3 *a*) El efecto de la temperatura en la velocidad de transformación de fase es el resultado de las aportaciones de la velocidad de crecimiento y de la velocidad de formación de núcleos, que tiene como resultado una velocidad máxima de transformación a una temperatura crítica. *b*) En consecuencia, hay un tiempo mínimo ($t_{mín}$) necesario para la transformación, dado por la "curva C".

Ejemplo 12-1 *Energía de activación de la recristalización de cobre*

Determine la energía de activación de la recristalización de cobre a partir de las curvas sigmoides de la figura 12-2.

SOLUCIÓN

La velocidad de transformación es el recíproco del tiempo τ necesario para que ocurra la mitad de la transformación. A partir de la figura 12-2 se pueden calcular los tiempos que se requieren para una transformación de 50% a diferentes temperaturas:

T (°C)	T (K)	τ (s)	Velocidad (s^{-1})
135	408	540	0.00185
119	392	1320	0.00075
102	375	1600	2.083×10^{-4}
88	361	1.5×10^{4}	6.667×10^{-4}

La velocidad de transformación es la ecuación de Arrhenius, de modo que una gráfica de ln (rapidez de crecimiento) contra $1/T$ (figura 12-4 y ecuación 12-4) permite calcular las constantes de la ecuación. Luego se obtiene el log natural en ambos lados de la ecuación 12-4:

$$\ln(\text{Rapidez de crecimiento}) = \ln A - \frac{Q}{RT}$$

Así, si se grafica ln(rapidez de crecimiento) como una función de $1/T$, se espera obtener una recta con pendiente de $-Q/R$. Una regresión lineal de los datos se muestra en la figura 12-4, que indica que la pendiente $-Q/R = -10{,}494$ K. Por lo tanto,

$$Q = (10{,}494\ \text{K})\,[8.3145\ \text{J/(mol} \cdot \text{K)}] = 87{,}252\ \text{J/mol}$$

y la constante A se calcula como

$$\ln A = 19.497$$

$$A = \exp(19.497) = 2.93 \times 10^{8}\ s^{-1}$$

En este ejemplo particular, la rapidez a la que la reacción ocurre *aumenta* cuando se *incrementa* la temperatura, lo cual indica que la reacción puede estar dominada por difusión.

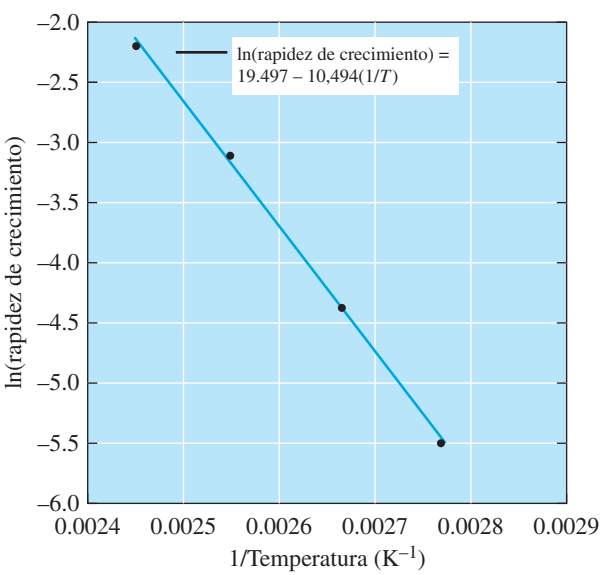


Figura 12-4 Gráfica de Arrhenius de la velocidad de transformación contra recíproco de la temperatura en el caso de la recristalización del cobre (ejemplo 12-1).

12-2 Aleaciones endurecidas por exceder el límite de solubilidad

En el capítulo 11 se explicó que las aleaciones de plomo y estaño que contienen de 2 a 19% de Sn pueden ser endurecidas por dispersión, porque se rebasa la solubilidad del estaño en el plomo.

Algo semejante ocurre en aleaciones de aluminio-cobre. Por ejemplo, la aleación de Al-4% Cu (que se muestra en la figura 12-5) es 100% α arriba de 500°C. La fase es una solución sólida de aluminio que contiene cobre hasta 5.65% pe. Cuando se enfría por debajo de la temperatura de solvus, se precipita una segunda fase, θ. La fase θ, que es el compuesto intermetálico $CuAl_2$ duro y frágil, proporciona endurecimiento por dispersión. Si se aplica la regla de la palanca al diagrama de fases que se ve en la figura 12-5, se puede demostrar que a 200°C y más abajo, en el caso de una aleación a 4% de cobre, sólo alrededor de 7.5% de la estructura final es θ. Se debe controlar la precipitación de la segunda fase para satisfacer los requisitos de un buen endurecimiento por dispersión.

Estructura Widmanstätten

La segunda fase puede crecer de modo que ciertos planos y direcciones del precipitado sean paralelos a planos y direcciones preferidos en la matriz, lo que crea un patrón de tejido de canasta conocido como **estructura Widmanstätten**. Este mecanismo de crecimiento reduce al mínimo las energías de deformación y superficiales y permite mayores velocidades de crecimiento. El crecimiento Widmanstätten produce un precipitado de aspecto característico. Cuando se produce una forma parecida a agujas [figura 12-6*a*)], el precipitado Widmanstätten puede estimular la nucleación de grietas, lo que reduce la ductilidad del material. Por el contrario, algunas de estas estructuras dificultan la propagación de las grietas, una vez formadas, con lo cual dan una buena tenacidad a la fractura. Ciertas aleaciones de titanio y cerámica obtienen tenacidad de esta forma.

Relaciones de energía interfacial

Se espera que el precipitado tenga una forma esférica para reducir al mínimo la energía superficial; no obstante, cuando el precipitado se forma en una interfase, su forma también es influida por la **energía interfacial** del límite entre los granos de la matriz y el precipitado. Suponiendo que en la segunda fase se formen núcleos en los límites del grano, las energías superficiales interfaciales del límite matriz-precipitado (γ_{mp}) y la energía de

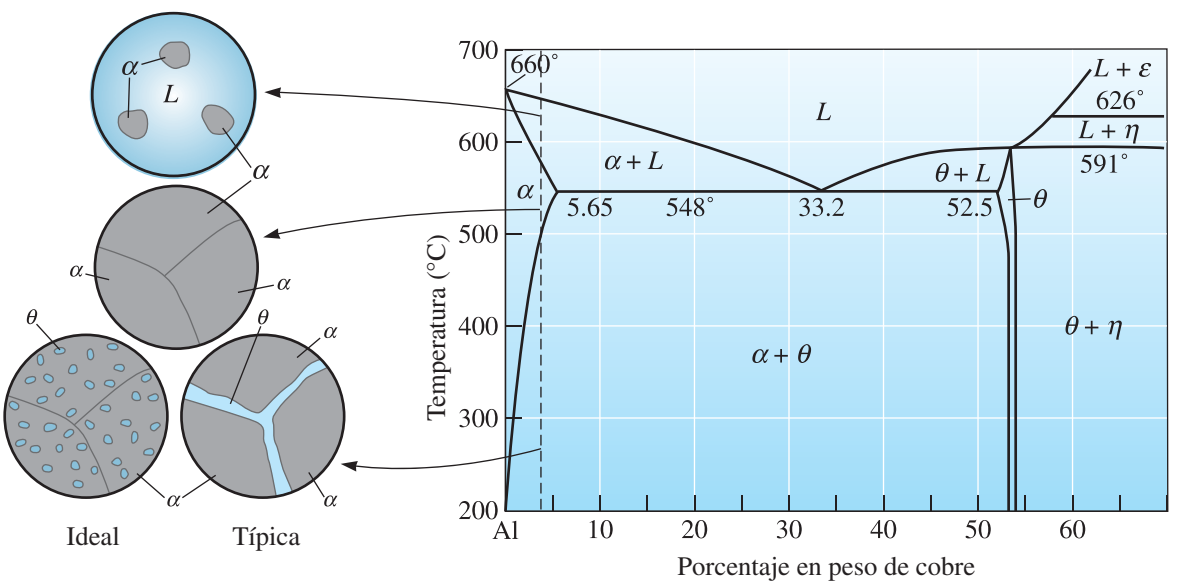
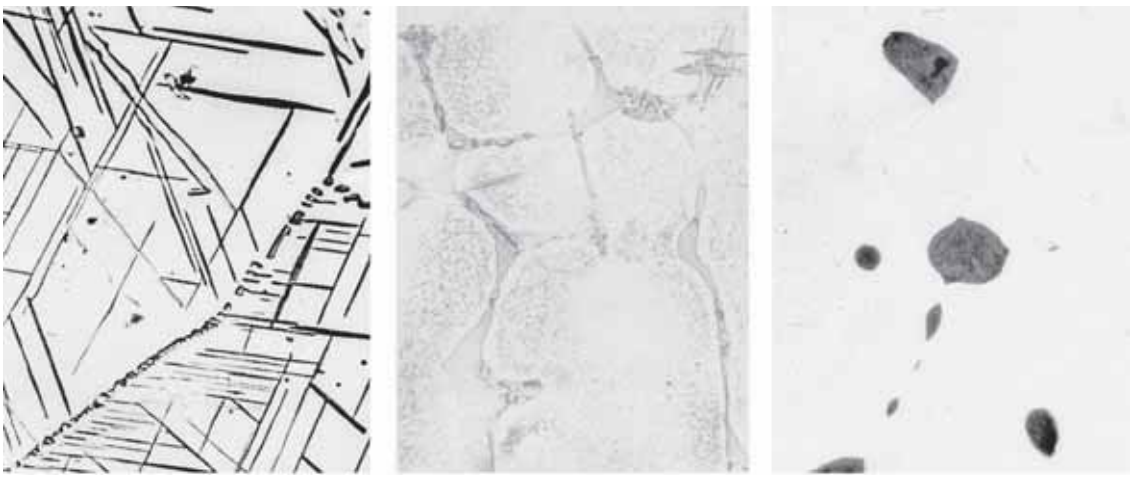


Figura 12-5 Parte del diagrama de fases de aluminio-cobre y microestructuras que pueden desarrollarse durante el enfriamiento de una aleación de Al-4% Cu.



a) *b*) *c*)

Figura 12-6 *a*) Agujas Widmanstätten en una aleación de Cu-Ti (420 ×). ([*Del* ASM Handbook, *vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados, www.asminternational.org*).] *b*) Precipitado continuo θ en una aleación Al-4% Cu, provocada por enfriamiento lento (500 ×). *c*) Precipitados de plomo en límites de grano en cobre (500 ×). [*Micrografías b) y c) reimpresas por cortesía de Don Askeland.*]

límite del grano de la matriz ($\gamma_{m,gb}$) fijan un **ángulo diedro** θ entre la interfase matriz-precipitado que, a su vez, determina la forma del precipitado (figura 12-7). La relación es

$$\gamma_{m,gb} = 2\gamma_{mp} \cos\frac{\theta}{2} \tag{12-5}$$

Observe que esta ecuación no se puede usar cuando el ángulo diedro es de 0° o 180°.

Si la fase del precipitado humedece completamente al grano (de manera semejante a la forma en que el agua humedece al vidrio), el ángulo diedro es cero, y la segunda fase crece como una capa continua a lo largo de los límites del grano de la fase matriz. Si el ángulo diedro es pequeño, el precipitado puede ser continuo. Si el precipitado también es duro y frágil, la película delgada que rodea los granos de la matriz hace que la aleación sea muy frágil [figura 12-6*b*)].

Por otra parte, se forman precipitados discontinuos e incluso esféricos cuando el ángulo diedro es grande [figura 12-6*c*)], fenómeno que ocurre si la fase del precipitado no humedece a la matriz.

Precipitado coherente

Incluso si se produce una distribución uniforme de precipitados, éstos pueden no alterar de manera importante la estructura de la matriz circundante [figura 12-8*a*)]. En consecuencia, el precipitado bloquea el deslizamiento sólo si se encuentra directamente en la trayectoria de la dislocación.

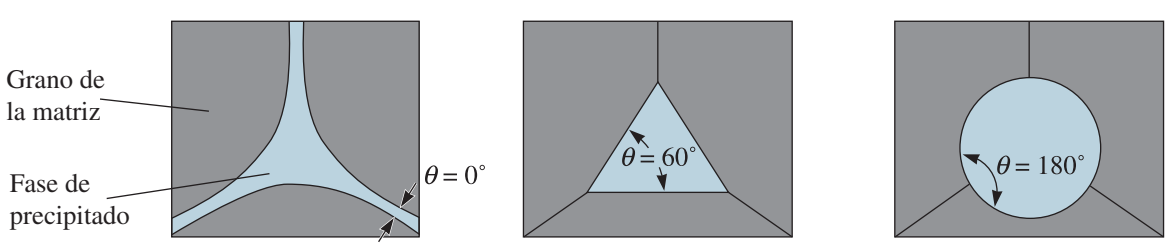
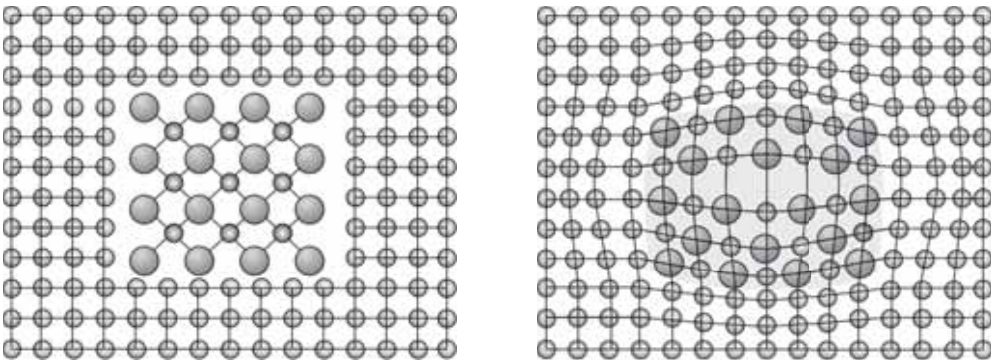


Figura 12-7 Efecto de la energía superficial y del ángulo diedro en la forma de un precipitado.



a) *b*)

Figura 12-8 *a*) Un precipitado no coherente no tiene relación con la estructura cristalina de la matriz circundante. *b*) Se forma un precipitado coherente, de modo que se establece una relación definida entre las estructuras cristalinas del precipitado y de la matriz.

Cuando se forma un **precipitado coherente**, los planos de átomos de la estructura cristalina del precipitado están relacionados con los planos de la estructura cristalina de la matriz, o incluso son continuos con estos planos [figura 12-8*b*)]. Cuando ello sucede se crea una disrupción extendida de la estructura cristalina de la matriz, y el movimiento de una dislocación se impide aun en el caso de que la dislocación simplemente pase cerca del precipitado coherente. Un tratamiento térmico especial, por ejemplo el endurecimiento por envejecimiento, puede producir el precipitado coherente.

12-3 Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación y sus aplicaciones

El **endurecimiento por envejecimiento**, o **endurecimiento por precipitación**, se produce por una secuencia de transformaciones de fase que lleva a una dispersión uniforme de precipitados coherentes a nanoescala en una matriz más dúctil y blanda. El suceso inadvertido de este proceso puede haber ayudado a los hermanos Wright, quienes el 17 de diciembre de 1903 efectuaron el primer vuelo manejable que cambió al mundo para siempre. Gayle y sus colegas demostraron que la aleación de aluminio empleada por los hermanos Wright para fabricar el motor del avión que voló por primera vez, adquirió cobre del molde de vaciado. El endurecimiento por envejecimiento ocurrió de forma inadvertida cuando el molde permaneció caliente durante el proceso de vaciado. La aplicación del endurecimiento por envejecimiento comenzó con el histórico vuelo de los hermanos Wright y, hasta la fecha, las aleaciones de aluminio que se emplean para fabricar aviones se endurecen mediante esta técnica. El endurecimiento por envejecimiento o por precipitación es quizás uno de los primeros ejemplos de materiales de nanoestructura que han hallado aplicaciones generalizadas.

Antes de examinar los detalles de los mecanismos de transformaciones de fase que son necesarias para endurecer por envejecimiento, es necesario analizar algunas de las aplicaciones de esta técnica. Una ventaja importante del endurecimiento por envejecimiento es que puede usarse para incrementar la resistencia a la fluencia (límite elástico) de numerosos materiales metálicos, por medio de tratamientos térmicos relativamente sencillos y sin cambiar de manera importante la densidad. De este modo, la relación entre resistencia y densidad de una aleación se puede mejorar considerablemente mediante este procedimiento. Por ejemplo, la resistencia a la fluencia de una aleación de aluminio puede incrementarse de 140 a 415 MPa como resultado de su aplicación.

Las superaleaciones basadas en níquel (aleaciones basadas en Ni, Cr, Al, Ti, Mo y C) son precipitaciones endurecidas por precipitación de una fase γ' semejante al Ni_3Al que es rica en Al y Ti. Del mismo modo, las aleaciones de titanio (por ejemplo, Ti − 6% Al − 4% V), aceros inoxidables, Be-Cu y otros aceros son endurecidos por precipitación y empleados para una amplia variedad de aplicaciones.

Se han diseñado nuevas fórmulas de lámina de acero para que el endurecimiento por precipitación ocurra en los materiales cuando la pintura del chasis está siendo "horneada" o curada (~100°C). Estos **aceros que se pueden endurecer al horno** son sólo un ejemplo de aceros que aprovechan el efecto reforzador que proporcionan los mecanismos de endurecimiento por envejecimiento.

Una debilidad asociada con este mecanismo es que las aleaciones endurecidas por envejecimiento pueden emplearse en una escala limitada de temperaturas. A temperaturas más altas, los precipitados formados inicialmente comienzan a crecer, y en última instancia se disuelven, si las temperaturas son lo suficientemente altas (sección 12-7). Aquí es donde las aleaciones, en las que se logra endurecimiento por dispersión con el uso de una segunda fase insoluble, son más eficaces que las aleaciones endurecidas por envejecimiento.

12-4 Evolución microestructural en endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

¿Cómo se forman los precipitados en el endurecimiento por precipitación? ¿Cómo crecen o envejecen? ¿Los precipitados pueden crecer demasiado, o envejecer en exceso, de modo que no puedan dar un máximo endurecimiento por dispersión? Las respuestas a estas preguntas se pueden hallar si se sigue la evolución microestructural en la secuencia de transformaciones de fase que son necesarias para el endurecimiento por envejecimiento.

Se usa el Al-Cu como sistema arquetípico para ilustrar estas ideas. La aleación Al-4% Cu es un ejemplo clásico de una aleación que puede endurecerse por medio de este procedimiento, que sigue una secuencia típica de tres pasos (figura 12-9).

Paso 1: Tratamiento por solución

En el **tratamiento por solución**, la aleación se calienta primero por encima de la temperatura de solvus y se mantiene en ese punto hasta que se produce una solución α sólida homogénea. Este paso disuelve el precipitado de fase θ y reduce cualquier segregación microquímica presente en la aleación original.

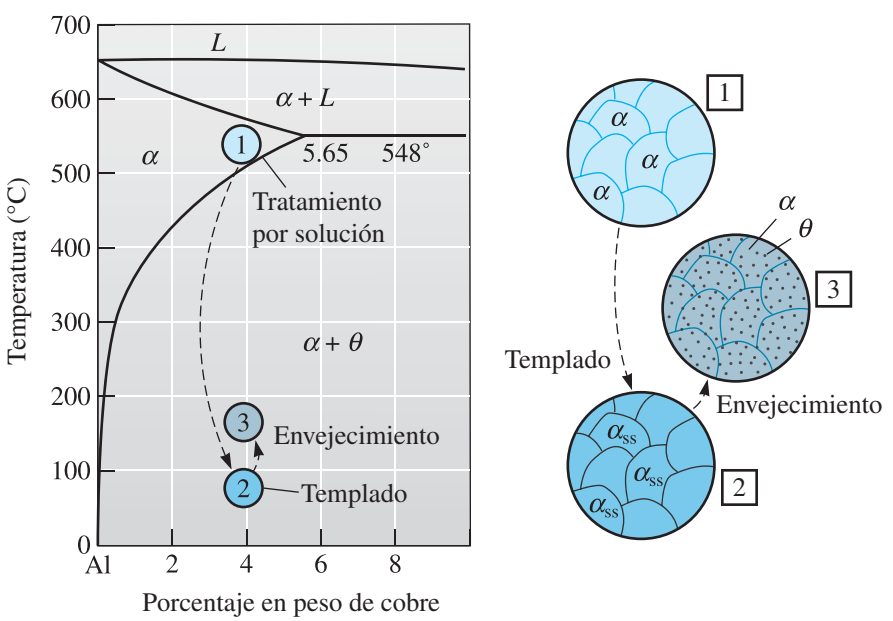


Figura 12-9 Diagrama de un extremo rico en aluminio de la fase aluminio-cobre que muestra los tres pasos del tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento y las microestructuras que se producen.

Se podría calentar la aleación a una temperatura justo debajo de la de solidus e incrementar la rapidez de homogenización, pero la presencia de un microconstituyente eutéctico fuera de equilibrio puede provocar fusión (fragilidad en caliente, capítulo 11). Así, la aleación Al-4% Cu es tratada por solución entre 500 y 548°C, esto es, entre las temperaturas de solvus y eutéctica.

Paso 2: Templado Después del tratamiento por solución, la aleación, que contiene sólo α en su estructura, se enfría rápidamente, es decir, se templa. Los átomos no tienen tiempo de difundirse hacia potenciales sitios de formación de núcleos, de modo que no se forma θ. Después del templado, la estructura es una **solución sólida sobresaturada,** α_{ss}**,** que contiene exceso de cobre, y no es una estructura en equilibrio sino metaestable. Esta situación es la misma que el subenfriamiento de agua, metales fundidos y vidrios de silicato (capítulo 9). La única diferencia es que se está tratando con materiales en su estado sólido.

Paso 3: Envejecimiento Finalmente, la sobresaturada se calienta a una temperatura debajo de la temperatura de solvus. A esta temperatura de *envejecimiento*, los átomos se difunden sólo cortas distancias. Como la α sobresaturada es metaestable, los átomos adicionales de cobre se difunden hacia numerosos sitios de formación de núcleos y los precipitados crecen. Al final, si se mantiene la aleación durante tiempo suficiente a la temperatura de envejecimiento, se produce la estructura de equilibrio $\alpha + \theta$. Observe que aun cuando la estructura que se forma tiene dos fases de equilibrio (es decir, $\alpha + \theta$), la morfología de las fases es diferente de la estructura que se hubiera obtenido por el lento enfriamiento de esta aleación (figura 12-5). Cuando se pasa por las tres etapas descritas, se produce la fase θ en forma de partículas de precipitado de segunda fase dispersas de manera uniforme y ultrafina. Esto es lo que se necesita para que se alcance un endurecimiento eficaz por precipitación.

Los siguientes dos ejemplos ilustran el efecto de templado en la composición de fases y un diseño para realizar un tratamiento de endurecimiento por envejecimiento.

Precipitados fuera de equilibrio durante el envejecimiento Durante el envejecimiento de aleaciones de aluminio-cobre, se forma una serie continua de otras fases de precipitados precursores antes de la formación de la fase θ de equilibrio. Este fenómeno es muy común en aleaciones endurecidas por precipitación. El diagrama simplificado de la figura 12-9 no muestra estas fases intermedias. Al principio del envejecimiento, los átomos de cobre se concentran en planos {100} en la matriz α y producen precipitados muy delgados llamados **zonas de Guinier-Preston (GP)**. A medida que continúa el envejecimiento, más átomos de cobre se difunden en el precipitado y las zonas GP-I se vuelven más gruesas y forman discos delgados, o zonas GP-II. Al seguir la difusión continua, los precipitados desarrollan un grado superior de orden y se denominan θ'. Al final, se produce el precipitado estable θ.

Los precipitados fuera de equilibrio GP-I, GP-II y θ' son coherentes. La resistencia de la aleación aumenta con el tiempo de envejecimiento cuando estas fases coherentes crecen en tamaño durante las etapas iniciales del tratamiento térmico. Cuando están presentes estos precipitados cohe-

Ejemplo 12-2 *Composición de fases de la aleación Al-4% Cu*

Compare la composición de la solución sólida en la aleación Al-4% Cu a temperatura ambiente, cuando la aleación se enfría bajo condiciones de equilibrio, con la composición cuando se templa.

SOLUCIÓN

En la figura 12-9 se puede trazar una línea de conexión a temperatura ambiente. La composición de α, determinada a partir de la línea de conexión, es de alrededor de 0.02% de Cu; no obstante, después del templado todavía muestra 4% de Cu. Como α contiene más que el contenido de cobre de equilibrio, está sobresaturada con cobre.

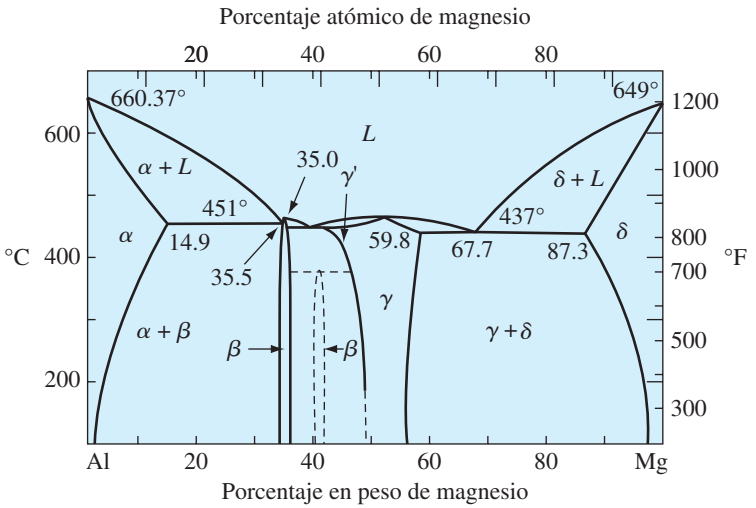


Figura 12-10 Diagrama de fases de aluminio-magnesio.

Ejemplo 12-3 *Diseño de un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento*

En la figura 12-10 se muestra una parte del diagrama de fases magnesio-aluminio. Suponga que una aleación Mg-8% Al es responsable de un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento. Diseñe un tratamiento térmico para la aleación.

SOLUCIÓN

Paso 1: Implemente un tratamiento por solución a una temperatura entre solvus y eutéctica para evitar fragilidad en caliente. Por ello, caliente entre 340 y 451°C.

Paso 2: Temple a temperatura ambiente lo suficientemente rápido para evitar que se forme el precipitado fase β.

Paso 3: Envejezca a una temperatura inferior a la de solvus, esto es, menor de 340°C, para formar una dispersión fina de la fase β.

rentes, la aleación está en condición envejecida. La figura 12-11 muestra la estructura de una aleación Al-Ag envejecida. Este importante desarrollo en la evolución de la microestructura de aleaciones endurecidas por precipitación es la razón por la cual el tiempo para el tratamiento térmico durante el envejecimiento es muy importante.

Cuando se precipita la fase θ estable no coherente, la resistencia de la aleación comienza a disminuir. A partir de ese momento la aleación está en condición envejecida en exceso. La θ todavía proporciona algún endurecimiento por dispersión, pero con el tiempo la θ crece más y hasta disminuye el simple efecto de endurecimiento por dispersión.

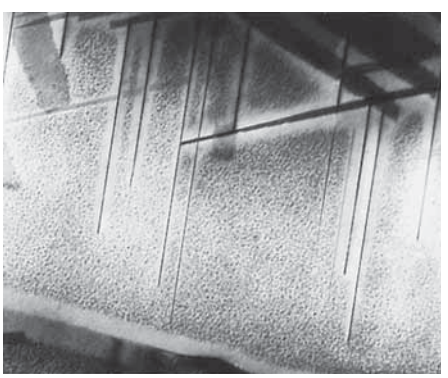


Figura 12-11 Micrografía electrónica de envejecimiento de Al-15% Ag que muestra placas coherentes γ' y zonas GP redondas (40,000 ×). [*Tomado de* ASM Handbook, *vol. 8 (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

12-5 Efectos de la temperatura y del tiempo de envejecimiento

Las propiedades de una aleación que puede endurecerse por envejecimiento dependen de la temperatura y del tiempo de envejecimiento (figura 12-12). A 260°C, la difusión en la aleación Al-4% Cu es veloz y rápidamente se forman precipitados. La resistencia alcanza un máximo después de una exposición de menos de 0.1 h. Ocurre exceso de envejecimiento si la aleación se mantiene durante más de 0.1 h (6 minutos).

A 190°C, que es una temperatura común de envejecimiento en el caso de numerosas aleaciones de aluminio, se requiere de un tiempo más largo para producir la resistencia óptima, pero se obtienen algunos beneficios si se aplica una temperatura menor. Primero, la resistencia máxima aumenta cuando disminuye la temperatura de envejecimiento. En segundo término, la aleación mantiene su máxima resistencia un tiempo más prolongado. En tercero, las propiedades son más uniformes. Si la aleación es envejecida durante sólo 10 minutos a 260°C, la superficie de la pieza alcanza la temperatura apropiada y se refuerza, pero el centro permanece frío y envejece sólo ligeramente. El siguiente ejemplo ilustra el efecto del tiempo del tratamiento térmico por envejecimiento en la resistencia de aleaciones de aluminio.

El envejecimiento ya sea a 190 o a 260°C se denomina **envejecimiento artificial** porque la aleación se calienta para producir el precipitado. Algunas aleaciones tratadas por solución y templadas envejecen a temperatura ambiente, a lo cual se le conoce como **envejecimiento natural**. El envejecimiento natural requiere de largos periodos, a veces de varios días, para alcanzar su máxima resistencia; no obstante, la máxima resistencia es más alta que la que se obtiene por envejecimiento artificial y no ocurre exceso de envejecimiento.

Ejemplo 12-4 *Efecto del tiempo del tratamiento térmico por envejecimiento en la resistencia de aleaciones de aluminio*

El operador de un horno salió una hora a tomar sus alimentos, sin remover la aleación de Al-4% Cu del horno empleado para el tratamiento por envejecimiento. Compare el efecto en la resistencia a la fluencia de la hora adicional de envejecimiento para temperaturas de envejecimiento de 190 y 260°C.

SOLUCIÓN

A 190 °C, la resistencia máxima de 400 MPa (60,000 psi) ocurre en 2 horas (figura 12-12). Después de 3 h, la resistencia es, en esencia, la misma.

A 260°C, la resistencia máxima de 340 MPa (50,000 psi) ocurre en 0.06 h; no obstante, después de 1 h, la resistencia disminuye a 250 MPa (35,000 psi).

Entonces, la mayor temperatura de envejecimiento proporciona una menor resistencia máxima y hace que la resistencia sea más sensible al tiempo de envejecimiento.

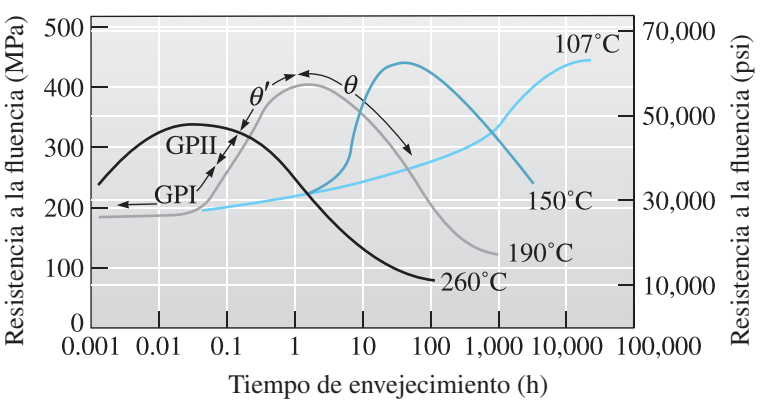


Figura 12-12 Efecto de la temperatura y del tiempo de envejecimiento en la resistencia a la fluencia de una aleación Al-4% Cu.

Una observación interesante que hizo el doctor Gayle y sus colegas de trabajo en el NIST es un sorprendente ejemplo de la diferencia entre el envejecimiento natural y el artificial. El equipo del doctor Gayle analizó la aleación de aluminio del motor empleado en el avión de los hermanos Wright y descubrieron dos cosas interesantes. Primero, hallaron que la aleación original había sido sometida a endurecimiento por precipitación como resultado de haber permanecido en el molde por un periodo y a una temperatura que fueron suficientes para provocar endurecimiento por precipitación. En segundo lugar, como la aleación fue colada en 1903, hasta 1993 cuando se realizó la investigación (casi 90 años después) la aleación había continuado envejeciendo de manera natural. Este proceso podía observarse en las dos distribuciones de tamaño diferente en las partículas del precipitado, que se logró mediante microscopia de transmisión electrónica. En algunas aleaciones de aluminio (designadas como T4) que se emplean para fabricar postes o pasadores cónicos, puede ser necesario refrigerar la aleación antes de la formación para evitar el envejecimiento natural a temperatura ambiente. Si no se hace así, la aleación envejecería a temperatura ambiente, se volvería más dura y no podría maquinarse.

12-6 Requerimientos para el endurecimiento por envejecimiento

No todas las aleaciones se pueden endurecer por envejecimiento. Deben satisfacerse cuatro condiciones para que una aleación tenga una respuesta de endurecimiento por envejecimiento durante el tratamiento térmico:

1. El sistema de la aleación debe presentar una solubilidad sólida decreciente con una temperatura decreciente. En otras palabras, la aleación debe formar una sola fase cuando se calienta por encima de la línea de solvus y luego tiene que entrar a una región de dos fases cuando se enfría.
2. La matriz debe ser relativamente blanda y dúctil, y el precipitado debe ser duro y frágil. En casi todas las aleaciones que se pueden endurecer por envejecimiento, el precipitado es un compuesto intermetálico frágil y duro.
3. La aleación debe poder templarse. Algunas aleaciones no se pueden enfriar con suficiente rapidez para suprimir la formación del precipitado. Sin embargo, el templado puede introducir esfuerzos residuales que provocan distorsión de la pieza (capítulo 8). Para reducir al mínimo los esfuerzos residuales, las aleaciones de aluminio se templan en agua caliente a unos 80°C.
4. Debe formarse un precipitado coherente.

Como se explicó en la sección 12-3, varias aleaciones importantes, entre ellas ciertos aceros inoxidables y aleaciones basadas en aluminio, magnesio, titanio, níquel, cromo, hierro y cobre, satisfacen estas condiciones y pueden ser endurecidas por envejecimiento.

12-7 Uso de aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento a altas temperaturas

Con base en el análisis anterior, no se debería seleccionar una aleación de Al-4% Cu endurecida por envejecimiento para emplearla a altas temperaturas. A temperaturas de servicio de 100 a 500°C, la aleación se envejece de manera excesiva y pierde su resistencia. Arriba de 500°C, la segunda fase vuelve a disolverse en la matriz y ni siquiera se obtiene endurecimiento por dispersión. En general, las aleaciones de aluminio que pueden endurecerse por envejecimiento están mejor adaptadas para servicio a temperaturas cercanas a la ambiente. No obstante, algunas aleaciones de magnesio pueden mantener su resistencia a unos 250°C y ciertas superaleaciones de níquel resisten el exceso de envejecimiento a 1000°C.

Es posible que también surjan problemas cuando se deben soldar aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento (figura 12-13). Durante la tarea, el metal adyacente a la soldadura se calienta. La *zona afectada por el calor* (ZAC) contiene dos zonas principales. La zona de temperatura más baja cerca del metal base no afectado está expuesta a temperaturas justo abajo de la de solvus y puede tener exceso de envejecimiento. La zona de temperatura más alta es tratada por solución,

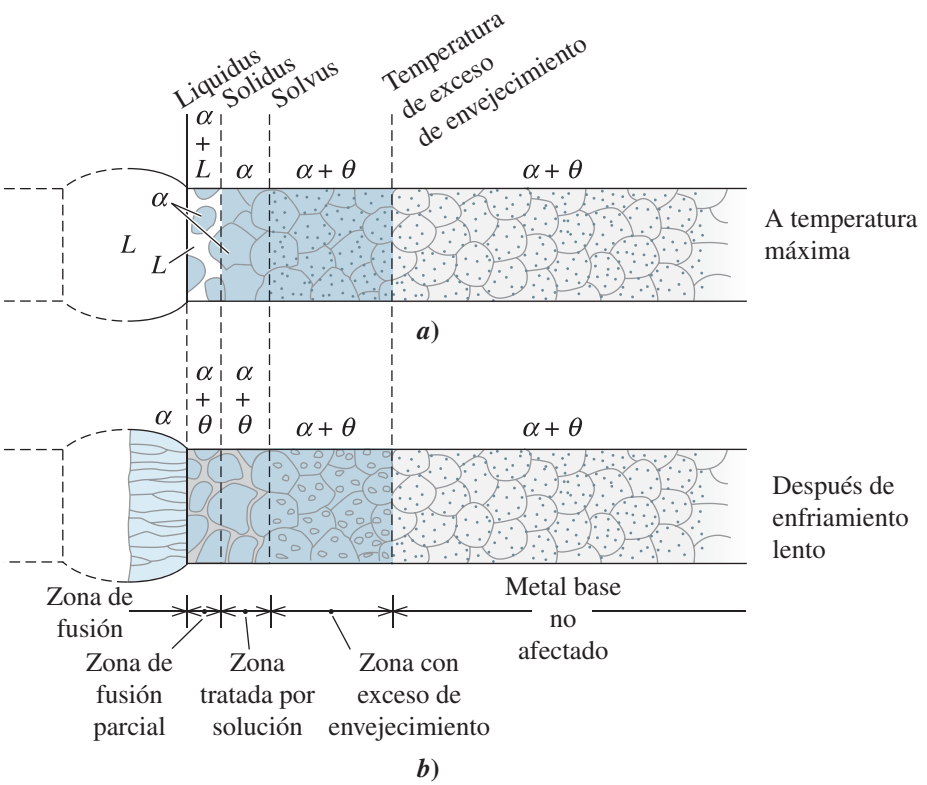


Figura 12-13 Cambios microestructurales que ocurren en aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento durante soldadura por fusión: *a*) microestructura en la soldadura a la temperatura máxima, y *b*) microestructura en la soldadura después de enfriamiento lento a temperatura ambiente.

lo cual elimina los efectos del endurecimiento por envejecimiento. Si la zona tratada por solución se enfría con lentitud, puede formarse una θ estable en los límites de granos que hace frágil la zona soldada. Los procesos de soldadura muy rápidos, por ejemplo la soldadura por haz de electrones, completan el tratamiento de recalentado de la zona después de la soldadura, o la soldadura de la aleación en la condición tratada por solución, mejoran la calidad de la tarea (capítulo 9). La soldadura de superaleaciones, con base de níquel reforzadas por endurecimiento por precipitación, no plantea esos problemas porque el proceso de precipitación es lento y el proceso de soldadura simplemente actúa como tratamiento por solución y templado. En fechas recientes también se ha aplicado el proceso de soldadura por agitación y fricción a la soldadura de aleaciones de Al y Al-Li para aplicaciones aeroespaciales y de aviones.

12-8 La reacción eutectoide

En el capítulo 11 se definió el eutectoide como una reacción de estado sólido en la que una fase sólida se transforma en otras dos fases sólidas:

$$S_1 \rightarrow S_2 + S_3 \tag{12-6}$$

Como ejemplo de la forma en que se puede usar la reacción eutectoide para controlar la microestructura y propiedades de una aleación, se debe examinar la parte tecnológicamente importante del diagrama de fases de hierro-carburo de hierro (Fe-Fe_3C) (figura 12-14), que es la base de los aceros y los hierros colados. La formación de las dos fases sólidas (α y Fe_3C) permite obtener endurecimiento por dispersión. La capacidad para controlar la presencia de la reacción eutectoide, que incluye hacer que ocurra, hacerla lenta o evitarla por completo, es quizás el paso más importante en el procesamiento termomecánico de los aceros. En el diagrama de Fe-Fe_3C, la temperatura eutectoide se conoce como temperatura A_1. El límite entre austenita (γ) y el campo de dos fases formado por ferrita (α) y austenita se conoce como A_3. El límite entre austenita (γ) y el campo de dos fases formado por cementita (Fe_3C) y austenita se conoce como A_{cm}.

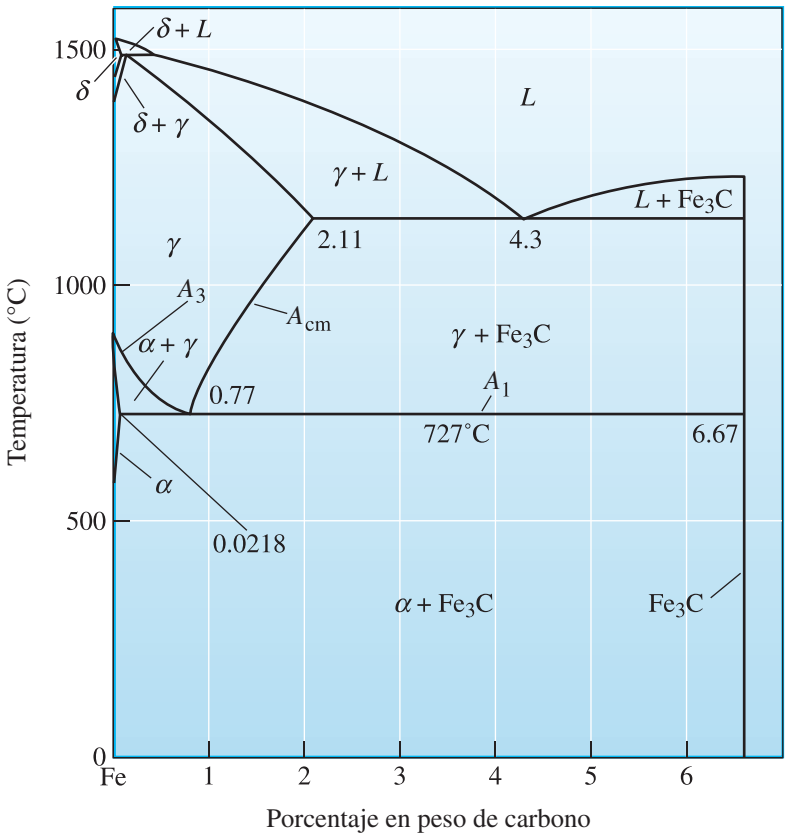


Figura 12-14 Diagrama de fases de Fe-Fe_3C (parte del diagrama Fe-C). La recta vertical en 6.67% C es el compuesto estequiométrico Fe_3C.

Por lo general no hay nada de interés en el extremo rico en carbono del diagrama de fases de Fe-C, por lo que el enfoque recae en el diagrama Fe-Fe_3C como parte del diagrama binario de fases de Fe-C.

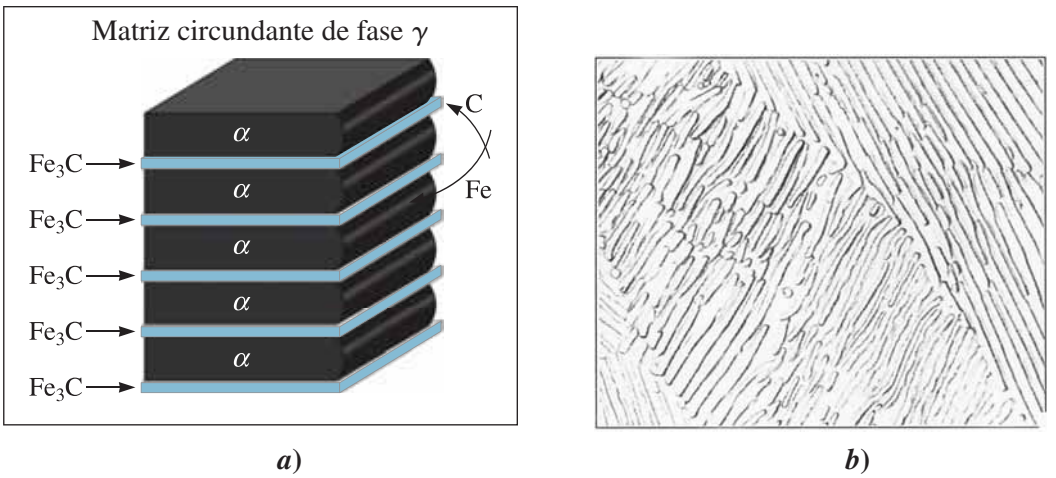
Soluciones sólidas

El hierro transita por dos transformaciones alotrópicas (capítulo 3) durante su calentamiento o enfriamiento. Inmediatamente después de la solidificación, el hierro forma una estructura CCCu llamada ferrita δ. Con más enfriamiento, el hierro se transforma en una estructura CCCa llamada γ, o **austenita**. Por último, el hierro se transforma de nuevo en la estructura CCCu a temperaturas más bajas; esta estructura recibe el nombre de α, o **ferrita**. Las dos ferritas (α y δ) y la austenita son soluciones sólidas de átomos intersticiales de carbono en hierro. Normalmente, cuando no se hace una referencia específica, el término ferrita se refiere a la ferrita α, porque esta es la fase que se encuentra con más frecuencia durante el tratamiento térmico de los aceros. Ciertos materiales de cerámica que se emplean en aplicaciones magnéticas también se conocen como ferritas, pero no están relacionados con la fase de ferrita del sistema Fe-Fe_3C.

Puesto que los vacíos intersticiales en la estructura cristalina CCCa son un poco más grandes que aquellos en la estructura cristalina CCCu, se puede acomodar un mayor número de átomos de carbono en el hierro CCCa. Así, la máxima solubilidad del carbono en austenita es de 2.11% C, mientras que la máxima solubilidad del carbono en hierro CCCu es mucho menor (es decir, ~0.0218% C en α y 0.09% C en δ). Las soluciones sólidas de carbono en hierro son relativamente blandas y dúctiles, pero son más fuertes que el hierro puro debido al endurecimiento por solución sólida por el carbono.

Compuestos

Se forma un compuesto estequiométrico Fe_3C, o **cementita**, cuando se rebasa la solubilidad del carbono en hierro sólido. El Fe_3C contiene 6.67% C, es extremadamente duro y frágil (como un material de cerámica), y está presente en todos los aceros comerciales. Si se controla de forma apropiada la cantidad, tamaño y forma del Fe_3C, se controla el grado de endurecimiento por dispersión y las propiedades del acero.



a) *b*)

Figura 12-15 Crecimiento y estructura de la perlita: *a*) redistribución del carbono y del hierro, y *b*) micrografía de laminillas de perlita (2000 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 7, Metallography and Microstructure (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

La reacción eutectoide

Si se calienta una aleación que contenga una composición eutectoide de 0.77% C arriba de 727°C, se produce una estructura que contiene sólo granos de austenita. Cuando la austenita se enfría a 727°C, comienza la reacción eutectoide:

$$\gamma\,(0.77\%\ \text{C}) \rightarrow \alpha\,(0.0218\%\ \text{C}) + \text{Fe}_3\text{C}(6.67\%\ \text{C}) \qquad (12\text{-}7)$$

Al igual que en la reacción eutéctica, las dos fases que se forman tienen composiciones diferentes, de modo que deben difundirse átomos durante la reacción (figura 12-15). La mayor parte del carbono de la austenita se difunde al Fe_3C y casi todos los átomos de hierro se difunden a la α. Esta redistribución de átomos es más fácil si las distancias de difusión son cortas, que es el caso cuando la α y el Fe_3C crecen en forma de laminillas o placas delgadas.

Perlita

La estructura laminar de α y Fe_3C que se desarrolla en el sistema hierro-carbono se denomina **perlita**, que es un microconstituyente del acero. Este compuesto se llamó así porque la perlita pulida y atacada químicamente muestra el colorido de la madreperla. Las laminillas de la perlita son mucho más finas que las del eutéctico de plomo-estaño, porque los átomos de hierro y carbono deben difundirse a través de la austenita sólida en vez de hacerlo por la líquida. Se puede considerar a la perlita como un nanocompuesto de metal-cerámica. El siguiente ejemplo muestra el cálculo de las cantidades de las fases del microconstituyente perlita.

Ejemplo 12-5 *Fases y composición de la perlita*

Calcule la cantidad de ferrita y cementita presentes en la perlita.

SOLUCIÓN

Como la perlita debe contener 0.77% C, usando la regla de la palanca:

$$\%\,\alpha = \left(\frac{6.67 - 0.77}{6.67 - 0.0218}\right) \times 100 = 88.7\%$$

$$\%\,\text{Fe}_3\text{C} = \left(\frac{0.77 - 0.0218}{6.67 - 0.0218}\right) \times 100 = 11.3\%$$

En el ejemplo 12-5 se vio que casi toda la perlita está compuesta por ferrita. En realidad, si se examina muy de cerca la perlita, se encuentra que las laminillas de Fe_3C están rodeadas de α. Por lo tanto, la estructura de la perlita produce endurecimiento por dispersión; la fase de ferrita continua es relativamente blanda y dúctil y la cementita dura y quebradiza está dispersa.

Microconstituyentes primarios Los aceros hipoeutectoides contienen menos de 0.77% C, mientras que los hipereutectoides presentan más de ese porcentaje. La ferrita es el microconstituyente primario (o proeutectoide) en aleaciones hipoeutectoides, y la cementita lo es en aleaciones hipereutectoides. Si se calienta una aleación hipoeutectoide que contenga 0.60% C arriba de 750°C, sólo quedará austenita en la microestructura. La figura 12-16 muestra lo que ocurre cuando la austenita se enfría. Justo debajo de 750°C se forman núcleos de ferrita y ésta crece, por lo general en los límites de granos de austenita. La ferrita primaria continúa creciendo hasta que la temperatura disminuye a 727°C. A esa temperatura, la austenita restante está rodeada de ferrita y su composición ha cambiado de 0.60% C a 0.77% C. Un enfriamiento subsiguiente a menos de 727°C hace que la austenita restante se transforme en perlita debido a la reacción eutectoide. La estructura contiene dos fases, ferrita y cementita, distribuidas como dos microconstituyentes: ferrita y perlita primarias. La microestructura final contiene islas de perlita rodeadas de la ferrita primaria [figura 12-17*a*)]. Esta estructura fortalece la aleación, debido a la perlita endurecida por dispersión, pero dúctil, a causa de la ferrita primaria continua.

En aleaciones hipereutectoides, la fase primara es Fe_3C, que se forma en los límites de granos de austenita. Después que la austenita se enfría a través de la reacción eutectoide, el acero contiene cementita dura y quebradiza que rodea las islas de perlita [figura 12-17*b*)].

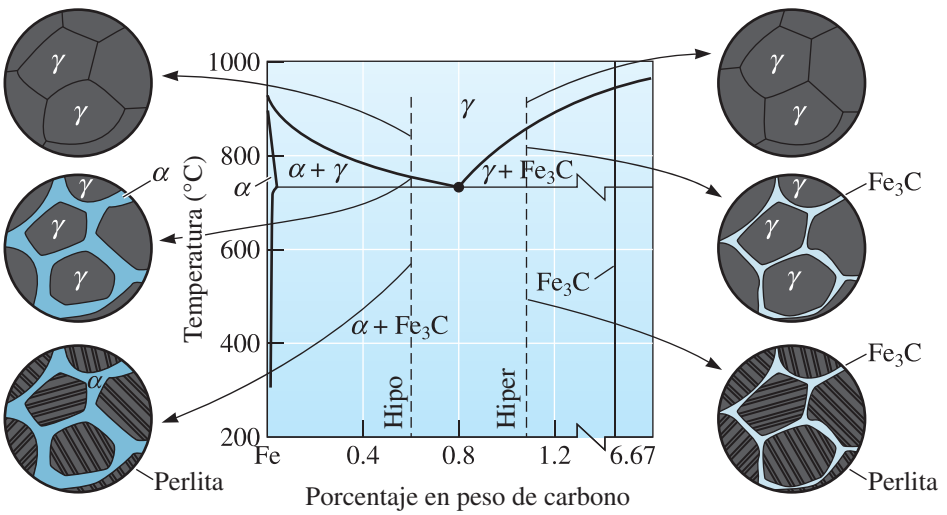
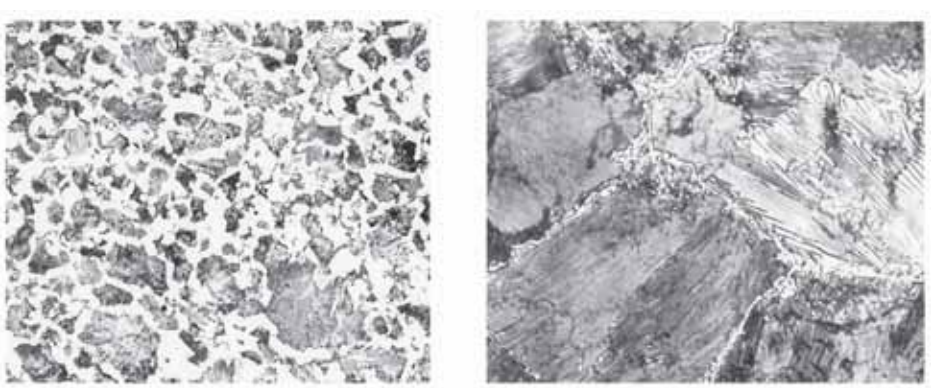


Figura 12-16 Evolución de la microestructura de los aceros hipoeutectoides e hipereutectoides durante el enfriamiento, en relación con el diagrama de fases de Fe-Fe_3C.



a) ***b)***

Figura 12-17 *a*) Acero hipoeutectoide que muestra alfa primaria (blanca) y perlita (400 ×). *b*) Acero hipereutectoide que muestra Fe_3C primaria que rodea a la perlita (800 ×). [*De* ASM Handbook, *vol.7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

Ahora, puesto que el microconstituyente duro y frágil es continuo, el acero también es quebradizo. Por fortuna, es posible mejorar la microestructura y propiedades de los aceros hipereutectoides mediante un tratamiento térmico. El siguiente ejemplo muestra el cálculo de las cantidades y composiciones de fases y microconstituyentes presentes en un acero al carbono simple.

Ejemplo 12-6 *Fases en un acero hipoeutectoide al carbono simple*

Calcule las cantidades y composiciones de fases y microconstituyentes en una aleación Fe-0.60% C a 726°C.

SOLUCIÓN

Las fases son ferrita y cementita. Usando una línea de conexión y aplicando la ley de la palanca a 726°C, se encuentra que

$$\alpha(0.0218\%\ \text{C})\ \%\ \alpha = \left(\frac{6.67 - 0.60}{6.67 - 0.0218}\right) \times 100 = 91.3\%$$

$$\text{Fe}_3\text{C}(6.67\%\ \text{C})\ \%\ \text{Fe}_3\text{C} = \left(\frac{0.60 - 0.0218}{6.67 - 0.0218}\right) \times 100 = 8.7\%$$

Los microconstituyentes son ferrita y perlita primarias. Si se traza una línea de conexión justo por encima de los 727°C, es posible calcular las cantidades de las composiciones de ferrita y austenita exactamente antes de que comience la reacción eutectoide. A esa temperatura toda la austenita tendrá la composición eutectoide (es decir, contendrá 0.77% C) y se transformará en perlita; por su parte, toda la ferrita proeutectoide permanecerá como ferrita primaria.

$$\alpha \text{ primaria } (0.0218\%\ \text{C})\%\ \alpha \text{ primaria} = \left(\frac{0.77 - 0.60}{0.77 - 0.0218}\right) \times 100 = 22.7\%$$

$$\text{Austenita justo arriba de } 727\ ^\circ\text{C} = \text{Pearlita: } 0.77\%\,\text{C}$$

$$\text{Porcentaje de perlita} = \left(\frac{0.60 - 0.0218}{0.77 - 0.0218}\right) \times 100 = 77.3\%$$

12-9 Control de la reacción eutectoide

Se controla el endurecimiento por dispersión en las aleaciones eutectoides en forma muy semejante a como se hace en las aleaciones eutécticas (capítulo 11).

Control de la cantidad del eutectoide

Cuando cambia la composición de la aleación, también lo hace la cantidad de la segunda fase dura. Cuando el contenido de carbono del acero aumenta hacia la composición eutectoide de 0.77% C, las cantidades de Fe_3C y perlita se incrementan, lo que incrementa la resistencia. Este efecto de endurecimiento llega por último a un máximo, y las propiedades se nivelan o incluso disminuyen cuando el contenido de carbono es demasiado alto (tabla 12-1).

Tabla 12-1 Efecto del carbono en la resistencia de los aceros

	Enfriamiento lento (perlita gruesa)			Enfriamiento rápido (perlita fina)		
Porcentaje de carbono	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Porcentaje de elongación	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Porcentaje de elongación
0.20	295	395	36.5	346	442	36.0
0.40	355	520	30.0	374	590	28.0
0.60	372	625	23.0	420	776	18.0
0.80	375	615	25.0	525	1010	11.0
0.95	379	660	13.0	500	1015	9.5

(Basado en Metals Progress Materials and Processing Databook, *1981.)*

Control del tamaño de grano de la austenita

La perlita crece como granos o *colonias*. Dentro de cada una de éstas, la orientación de las laminillas es idéntica. Las colonias nuclean más fácilmente en los límites de granos de los granos originales de austenita. Es posible incrementar el número de colonias de perlita si se reduce el tamaño previo de granos de austenita, por lo general mediante temperaturas bajas para producir la austenita. La resistencia de la aleación se incrementa cuando aumenta el número de las colonias de perlitas y disminuye su tamaño, lo que genera mayores obstáculos para el movimiento por dislocación, pues crea más límites entre las colonias.

Control de la velocidad de enfriamiento

Cuando aumenta la velocidad de enfriamiento durante la reacción eutectoide, se reduce la distancia a la cual los átomos pueden difundirse. En consecuencia, las laminillas producidas durante la reacción son más finas o están más cercanamente espaciadas. Cuando se produce perlita fina, aumenta la resistencia de la aleación (tabla 12-1 y figura 12-18).

Control de la temperatura de transformación

La reacción eutectoide de estado sólido es más bien lenta, y el acero puede enfriarse por debajo de la temperatura eutectoide de equilibrio antes de que comience la transformación (es decir, la fase austenítica puede estar subenfriada). Menores temperaturas de transformación generan una estructura más fina y fuerte (figura 12-19), influyen en el tiempo necesario para la transformación y hasta alteran la dis-

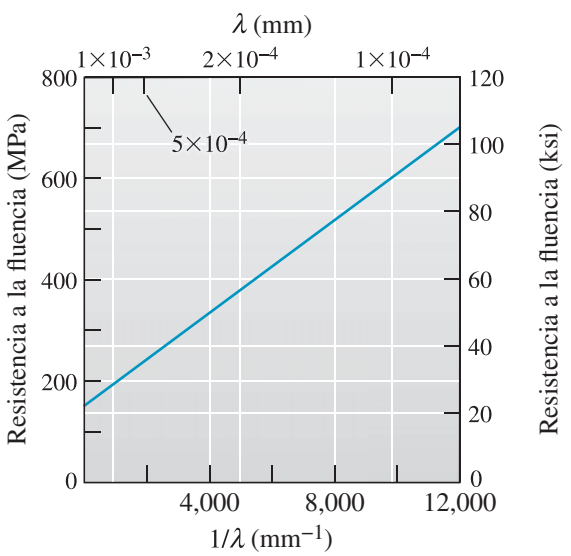


Figura 12-18 Efecto de la separación entre láminas (λ) en la resistencia a la fluencia de la perlita.

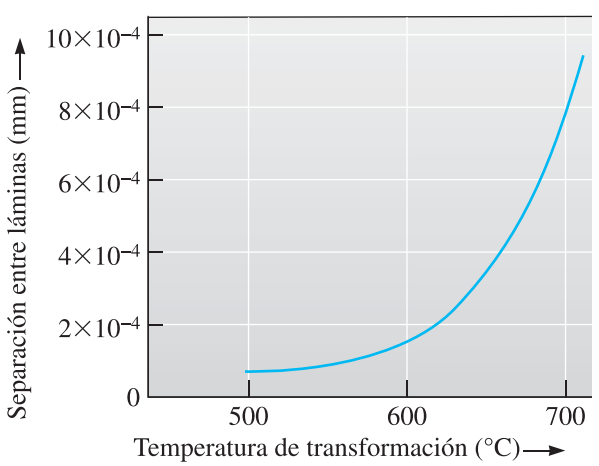


Figura 12-19 Efecto de la temperatura de transformación de la austenita en la separación entre láminas en perlita.

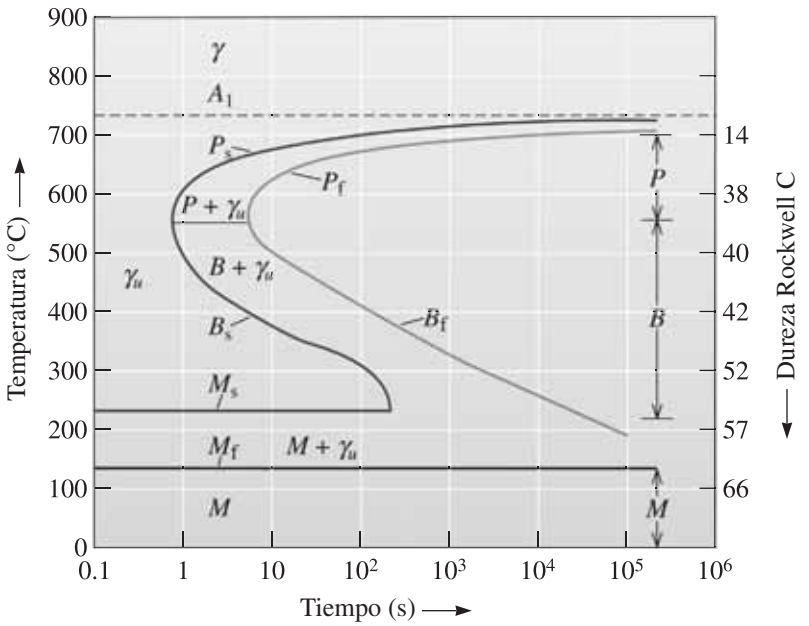


Figura 12-20 Diagrama de tiempo-temperatura-transformación (TTT) de un acero eutectoide, donde P = perlita, B = bainita y M = martensita. Los subíndices "s" y "f" indican el inicio y terminación de una transformación. γ_u es austenita inestable.

tribución de las dos fases. Esta información está contenida en el **diagrama de tiempo-temperatura-transformación** (TTT) (figura 12-20), también llamado diagrama de **transformación isotérmica (TI)** o curva C, permite pronosticar la estructura, propiedades y tratamiento térmico que requieren los aceros.

La forma del diagrama TTT es una consecuencia de la cinética de la reacción eutectoide y es semejante al diagrama ilustrado por la relación de Avrami (figura 12-3). A cualquier temperatura específica, una curva sigmoide describe la rapidez a la que la austenita se transforma en una mezcla de ferrita y cementita (figura 12-21). Se requiere de cierto tiempo de incubación para la nucleación. La curva P_s (inicio de perlita) representa el tiempo en el que la austenita comienza a transformarse en ferrita y cementita por medio de la transformación eutectoide. La curva sigmoide también señala el tiempo en el que la transformación está completa; este tiempo está dado por la curva P_f (acabado de perlita). Cuando la temperatura desciende de 727°C, aumenta la rapidez de nucleación, en tanto que disminuye la rapidez de crecimiento del microconstituyente. Al igual que en la figura 12-3, se encuentra una velocidad máxima de transformación, o tiempo mínimo de transformación; la velocidad máxima de transformación ocurre cerca de 550°C en el caso de un acero eutectoide (figura 12-20).

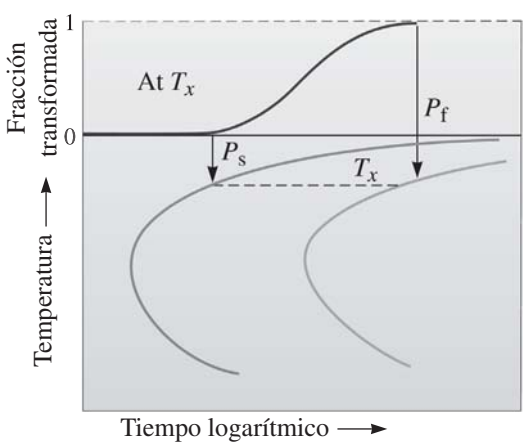


Figura 12-21 La curva sigmoide se relacionada con los tiempos de inicio y terminación en el diagrama TTT para el acero. En este caso, la austenita se está transformando en perlita.

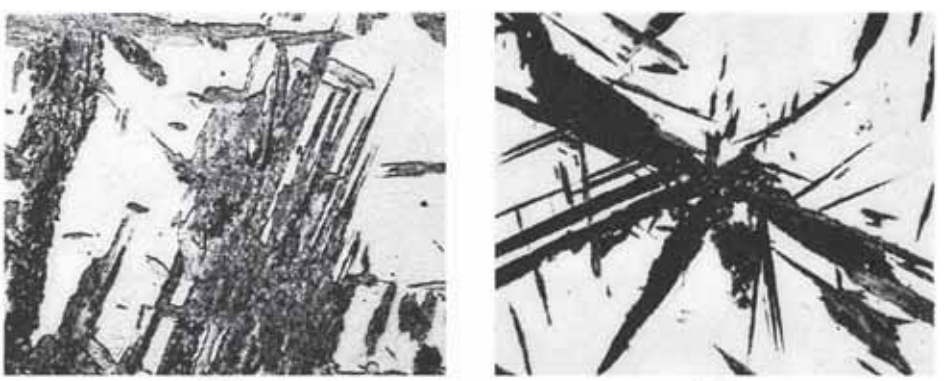
Como resultado de la transformación, se producen dos tipos de microconstituyentes. Se forma perlita (*P*) arriba de 550°C y, a temperaturas más bajas, se forma bainita (*B*).

Formación de núcleos y crecimiento de fases en la perlita: Si se templa justo debajo de la temperatura eutectoide, la austenita se enfría sólo ligeramente. Se requieren tiempos prolongados para que se formen núcleos estables de ferrita y cementita. Después de que nuclean las fases que forman perlita, los átomos se difunden rápidamente y se produce perlita *gruesa*; la transformación está completa al tiempo de terminación de la perlita (P_f). La austenita templada a menor temperatura se subenfría mucho más. En consecuencia, la nucleación ocurre con mayor rapidez y el P_s es más corto. La difusión también es más lenta, de modo que los átomos se difunden sólo a cortas distancias y se produce perlita *fina*. Aun cuando las magnitudes de rapidez de crecimiento son más lentas, el tiempo total necesario para la transformación se reduce debido al menor tiempo de incubación. La perlita más fina se forma en tiempos más cortos cuando se reduce la temperatura isotérmica de transformación a unos 550°C, que es la *nariz*, o *rodilla*, de la curva TTT (figura 12-20).

Formación de núcleos y crecimiento de fases en la bainita: A una temperatura justo debajo de la nariz del diagrama TTT, la difusión es muy lenta y aumentan los tiempos totales de transformación. Además, ¡se encuentra una microestructura diferente! A bajas temperaturas de transformación, las laminillas en la perlita tendrían que ser extremadamente delgadas y, en consecuencia, el área límite entre la ferrita y las laminillas de Fe_3C sería muy grande. Debido a la energía asociada con la interfase de ferrita-cementita, la energía total del acero tendría que ser muy alta. El acero puede reducir su energía interna si se permite que la cementita se precipite como partículas redondas y discretas en una matriz de ferrita. Este nuevo microconstituyente, o distribución de ferrita y cementita, se denomina **bainita**. La transformación comienza en el tiempo de inicio de bainita (B_s) y termina en el tiempo de terminación de bainita (B_f).

Los tiempos necesarios para que la austenita inicie y termine su transformación en bainita aumentan y ésta se hace más fina a medida que disminuye la temperatura de transformación. La bainita que se forma justo debajo de la nariz de la curva se denomina bainita gruesa, superior o plumosa. La que se forma a temperaturas más bajas recibe el nombre de bainita fina, inferior o acicular. La figura 12-22 muestra microestructuras comunes de la bainita. Observe que la morfología de la bainita depende del tratamiento térmico que se utilice.

La figura 12-23 muestra el efecto de la temperatura de transformación en las propiedades de un acero eutectoide (0.77% C). Cuando la temperatura disminuye, se conforma una tendencia general hacia una mayor resistencia y menor ductilidad debido a la microestructura más fina que se produce. Los siguientes dos ejemplos ilustran la forma en que es posible diseñar tratamientos térmicos de aceros para producir microestructuras y propiedades deseadas.



a) ***b)***

Figura 12-22 *a*) Bainita superior (placas grises, con forma de plumas) (600 ×). *b*) Bainita inferior (agujas oscuras) (400 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 8, (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

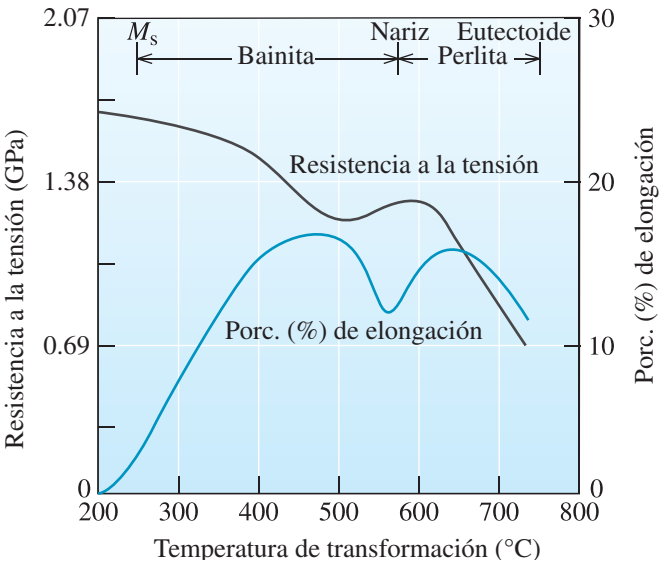


Figura 12-23 Efecto de la temperatura de transformación en las propiedades de un acero eutectoide.

Ejemplo 12-7 *Diseño de un tratamiento térmico para generar la microestructura de perlita*

Diseñe un tratamiento térmico para producir la estructura de perlita que se muestra en la figura 12-15*b*).

SOLUCIÓN

Primero se debe determinar la separación entre láminas de la perlita. Si se cuenta el número de separaciones entre láminas arriba a la derecha en la figura 12-15*b*), y se recuerda que la separación entre láminas se mide de una placa α a la siguiente placa α, se encuentran 14 espacios en una distancia de 20 mm. Debido al factor de amplificación de 2000, estos 20 mm de distancia son en realidad 0.01 mm. Entonces,

$$\lambda = \frac{0.01 \text{ mm}}{14 \text{ espacios}} = 7.14 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

Si se supone que la perlita se forma a causa de una transformación isotérmica, se determina en la figura 12-19 que la temperatura de transformación debe haber sido aproximadamente de 700°C. Con base en el diagrama TTT (figura 12-20), el tratamiento térmico debería ser

1. Calentar el acero a unos 750°C y mantenerlo así, quizás una hora, para producir sólo austenita. Una temperatura más alta puede producir un crecimiento excesivo de granos de austenita.
2. Templar a 700°C y mantenerlo así por lo menos 10^5 s (el tiempo P_f). Se supone aquí que el acero se enfría instantáneamente a 700°C. En la práctica, esto no sucede y, por lo tanto, la transformación no ocurre a una sola temperatura. Es posible que sea necesario usar los diagramas de transformación de enfriamiento continuo para ser más precisos (vea el capítulo 13).
3. Enfríe a temperatura ambiente.

El acero debería tener una dureza de DRC 14 (figura 12-20) y una resistencia a la fluencia de unos 200 MPa (30,000 psi) de la figura 12-18.

Ejemplo 12-8 *Tratamiento térmico para generar la microestructura de bainita*

La vainita ofrece excelentes combinaciones de dureza, resistencia y tenacidad. Una planta para tratamiento térmico austenitizó un acero eutectoide a 750°C, lo templó y lo mantuvo a 250°C durante 15 minutos, y finalmente permitió que se enfriara a temperatura ambiente. ¿Se produjo la estructura bainítica que se requería?

SOLUCIÓN

Examine el tratamiento térmico que se empleó en la figura 12-20. Después de calentar a 750°C, la microestructura es 100% γ. Después de templar a 250°C, permanece austenita inestable durante ligeramente más de 100 s, cuando comienza a crecer bainita fina. Después de 15 minutos, o 900 s, se ha formado alrededor de 50% de bainita fina y el resto del acero todavía contiene austenita inestable. Como se verá más adelante, la austenita inestable se transforma en martensita cuando el acero se enfría a temperatura ambiente, y la estructura final es una mezcla de bainita y martensita dura y quebradiza. ¡El tratamiento térmico no fue bueno! La planta de tratamiento debió haber mantenido el acero a 250°C por lo menos 10^4 s, es decir, unas 3 horas.

12-10 La reacción martensítica y el revenido

La **martensita** es una fase que se forma como resultado de una transformación de estado sólido sin difusión. En esta transformación no hay difusión y, por lo tanto, no sigue la cinética de transformación de Avrami. La rapidez de crecimiento en **transformaciones martensíticas** (también conocidas como **transformaciones displasivas** o **atérmicas**) es tan alta que la formación de núcleos se convierte en el paso de control.

El cobalto, por ejemplo, se transforma de una estructura cristalina CCCa en una CH mediante un ligero cambio en las ubicaciones atómicas que altera la secuencia de apilamiento de los planos compactos. Como la reacción no depende de la difusión, la reacción de la martensita es una transformación atérmica, es decir, depende sólo de la temperatura, no del tiempo. Es frecuente que la reacción martensítica prosiga a gran velocidad, con una rapidez que se aproxima a la velocidad del sonido en el material.

Muchas otras aleaciones (por ejemplo Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni y Ni-Ti) y materiales de cerámica muestran transformaciones de fase martensíticas. Estas transformaciones también pueden ser activadas por la aplicación de esfuerzos mecánicos. Otro material diferente de la martensita que se forma en ciertos tipos de aceros, la aleación Ni-Ti, conocida como **nitinol**, es quizás el ejemplo mejor conocido de aleaciones que usan transformaciones de fase martensítica. Estos materiales pueden recordar su forma y se conocen como aleaciones con memoria de forma (AMF). (Vea la sección 12-11.)

Martensita en aceros

En aceros con menos de alrededor de 0.2% C, cuando la austenita CCCa se templa se puede transformar en una estructura martensítica CCCu sobresaturada fuera de equilibrio. En aceros con contenido mayor de carbono, la reacción martensítica se presenta cuando la austenita CCCa se transforma en martensita TCCu (tetragonal centrada en el cuerpo). La relación entre la austenita CCCa y la martensita TCCu [figura 12-24*a*)] muestra que los átomos de carbono, del tipo (1/2, 0, 0) de sitios intersticiales de la celda CCCa, pueden quedar atrapados durante la transformación a una estructura centrada en el cuerpo, provocando que se produzca la estructura tetragonal. Cuando aumenta el contenido de carbono del acero, un gran número de átomos de carbono quedan atrapados en estos sitios, con lo cual aumenta la diferencia en longitud entre los ejes *a* y *c* de la martensita [figura 12-24*b*)].

El acero debe ser templado, o enfriado rápidamente, a partir de la región austenítica estable, para evitar la formación de perlita, bainita o microconstituyentes primarios. La reacción martensítica comienza en un acero eutectoide cuando la austenita se enfría por debajo de 220°C, que es la temperatura de inicio de la martensita (M_s) (figura 12-20). La cantidad de martensita aumenta cuando disminuye la temperatura. Cuando la temperatura pasa por debajo de la temperatura de terminación de la martensita (M_f), el acero debe contener 100% de martensita. A cualquier temperatura intermedia, la cantidad de martensita no cambia cuando aumenta el tiempo a esa temperatura.

Debido a la ley de conservación de la masa, la composición de la martensita debe ser igual a la de la austenita de la cual se forma. No hay difusión de largo alcance durante la transformación que pueda modificar la composición. En consecuencia, en aleaciones de hierro y carbono, la composición inicial de austenita y la composición final de martensita son iguales. El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se emplea un tratamiento térmico para producir un acero de dos fases.

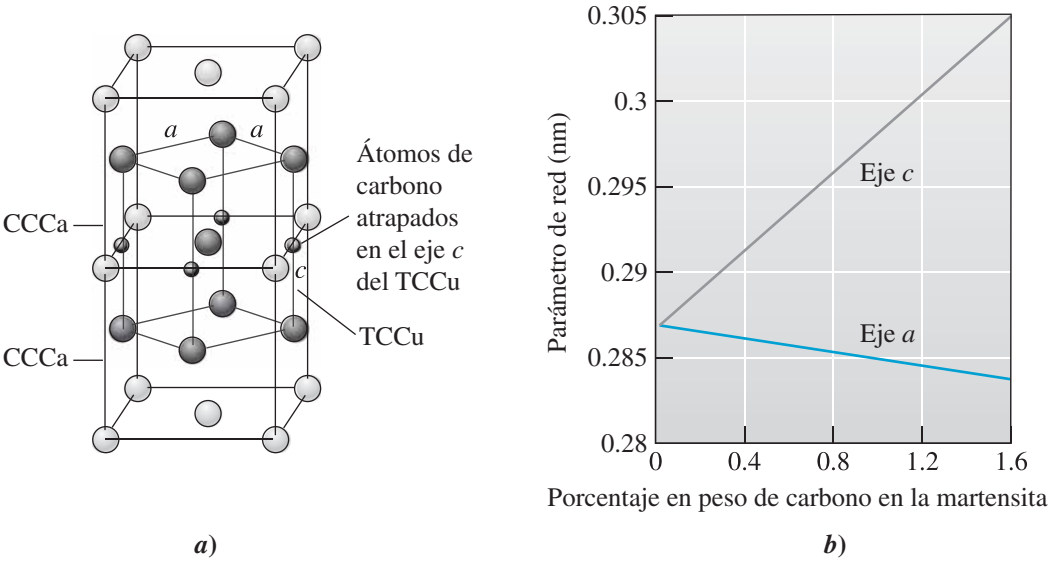


Figura 12-24 *a*) La celda unitaria de la martensita TCCu está relacionada con la celda unitaria de austenita CCCa. *b*) Cuando aumenta el porcentaje de carbono, más sitios intersticiales son llenados por los átomos de carbono, y la estructura tetragonal de la martensita se vuelve más pronunciada.

Ejemplo 12-9 *Diseño de un tratamiento térmico para un acero de dos fases*

Es posible obtener combinaciones poco comunes de propiedades al producir un acero con una microestructura que contenga 50% de ferrita y 50% de martensita. La martensita proporciona resistencia; la ferrita, ductilidad y tenacidad. Diseñe un tratamiento térmico para producir un acero de dos fases en el que la composición de la martensita sea de 0.60% C.

SOLUCIÓN

Para obtener una mezcla de ferrita y martensita es necesario tratar térmicamente un acero hipoeutectoide en la región $\alpha + \gamma$ del diagrama de fases. El acero se templa, lo que permite que la porción γ de la estructura se transforme en martensita.

La temperatura para el tratamiento térmico la fija el requerimiento de que el contenido de martensita sea de 0.60% C. De la línea de solubilidad entre las regiones γ y $\alpha + \gamma$, se encuentra que 0.60% C se obtiene en la austenita cuando la temperatura es alrededor de 750°C. Para producir 50% de martensita, se necesita seleccionar un acero que dé 50% de austenita cuando el acero se mantenga a 750°C. Si el contenido de carbono del acero es x, entonces

$$\%\,\gamma = \left(\frac{x - 0.02}{0.60 - 0.02}\right) \times 100 = 50 \quad \text{o} \quad x = 0.31\%\,\text{C}$$

El diseño final es

1. Seleccione un acero hipoeutectoide que contenga 0.31% C.
2. Caliente el acero a 750°C y manténgalo así (quizás una hora, dependiendo del grosor de la pieza) para producir una estructura que contenga 50% de ferrita y 50% de austenita, con 0.60%C en la austenita.
3. Temple el acero a temperatura ambiente. La austenita se transforma en martensita, que también contiene 0.60% C.

Propiedades de la martensita en el acero

En los aceros, la martensita es muy dura y frágil, como la cerámica. La estructura cristalina TCCu no tiene planos de deslizamiento o falla en donde se puedan mover con facilidad las dislocaciones. Además, está altamente

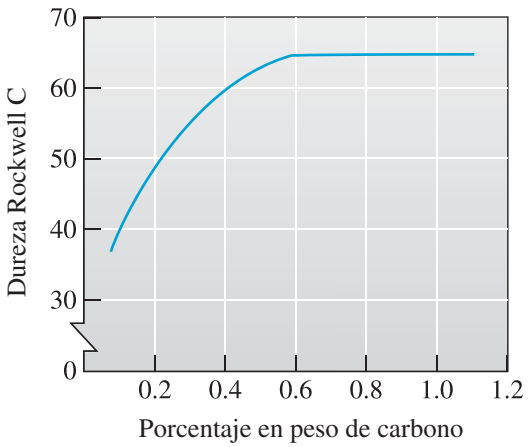


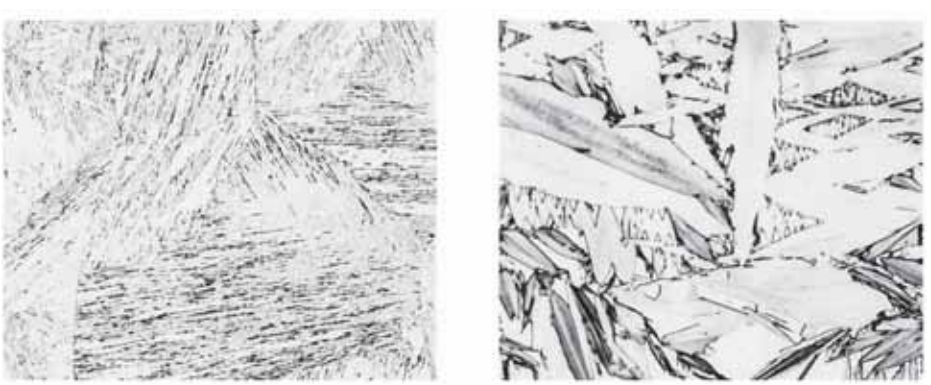
Figura 12-25 Efecto del contenido de carbono en la dureza de la martensita en aceros.

sobresaturada con carbono, dado que por lo general el hierro contiene menos de 0.0218% C a temperatura ambiente, y la martensita contiene la cantidad de carbono presente en el acero. Por último, la martensita tiene un tamaño fino de grano y una estructura incluso más fina dentro de los granos.

La estructura y propiedades de martensitas en el acero dependen del contenido de carbono en la aleación (figura 12-25). Cuando el contenido de carbono es bajo, la martensita crece en forma de "listones", compuestos por atados de placas planas y angostas que crecen una al lado de la otra [figura 12-26*a*)]. Esta martensita no es muy dura. Si el contenido de carbono es mayor, crece la martensita en placas, en forma de placas planas y angostas individuales más que como atados [figura 12-26*b*)]. La dureza es mucho mayor en la estructura de martensita en placas, cuyo contenido de carbono es mayor, en parte debido a la mayor distorsión o a una relación *c*/*a* grande de la estructura cristalina.

Revenido de la martensita en el acero

La martensita no es una fase en equilibrio. Esta es la razón por la que no aparece en el diagrama de fases de Fe-Fe_3C (figura 12-14). Cuando la martensita en un acero se calienta debajo de la temperatura eutectoide, las fases termodinámicamente estables de α y Fe_3C se precipitan. Este proceso se denomina **revenido**. La descomposición de la martensita en aceros provoca que la resistencia y dureza del acero se reduzca, al mismo tiempo que mejoran las propiedades de ductilidad e impacto (figura 12-27). Observe que, en este caso, el término revenido es diferente del vocablo que se usa para templar vidrios de silicato. En el templado de vidrios y revenido de aceros, no obstante, el resultado clave es un incremento de la tenacidad del material.



a) ***b)***

Figura 12-26 *a*) Martensita en "listones" en acero al bajo carbono (80 ×). *b*) Martensita en placas en acero de alto carbono (400 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 8 (1973), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

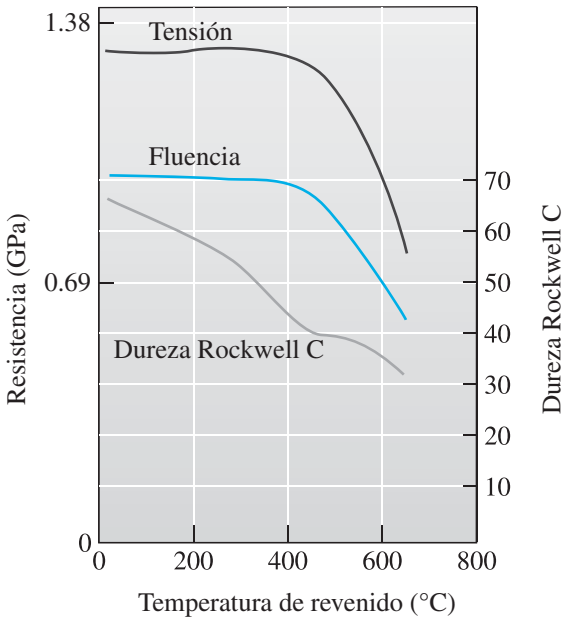


Figura 12-27 Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades de un acero eutectoide.

A bajas temperaturas de revenido, la martensita puede formar dos fases de transición, una martensita con un contenido más bajo en carbono y un carburo ε muy fino y fuera de equilibrio, o $Fe_{2.4}C$. El acero es aún fuerte, frágil y quizá hasta más duro que antes del revenido. A temperaturas más altas, se forman los α y Fe_3C estables, y el acero se ablanda y adquiere mayor ductilidad. Si el acero se reviene precisamente debajo de la temperatura eutectoide, el Fe_3C se hace muy grueso y el efecto de endurecimiento por dispersión se reduce en gran medida. Si se selecciona la temperatura apropiada de revenido, se puede obtener una amplia variedad de propiedades. El producto del proceso de revenido es un microconstituyente denominado martensita revenida (figura 12-28).

Martensita en otros sistemas

Las características de la reacción martensítica son diferentes en otros sistemas de aleación. Por ejemplo, se puede formar martensita en aleaciones con base de hierro que contienen poco o nada de carbono, por medio de una transformación de la estructura cristalina CCCa en una estructura cristalina CCCu. En ciertos aceros al alto manganeso y aceros inoxidables, la estructura CCCa cambia a una estructura cristalina CH durante la transformación martensítica. Además, la reacción martensítica ocurre durante la transformación de numerosos materiales cerámicos polimórficos, entre ellos el ZrO_2 e incluso en algunos polímeros cristalinos. Entonces, los términos reacción martensítica y martensita son más bien genéricos. En el contexto de propiedades, microestructura y tratamiento térmico de los aceros, el término "martensita" se refiere a la fase dura y quebradiza TCCu que se obtiene cuando se templan aceros.

Las propiedades de la martensita en otras aleaciones son también diferentes con respecto de las propiedades de la martensita de acero. En aleaciones de titanio, el titanio CCCu se transforma

Figura 12-28 Martensita revenida en acero (500 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

en una estructura martensítica CH durante el templado, pero la martensita de titanio es más blanda y débil que la estructura original. La martensita que se forma en otras aleaciones también se puede revenir. La que se produce en aleaciones de titanio se puede recalentar para permitir la precipitación de una segunda fase, pero a diferencia del caso del acero, el proceso de revenido *aumenta*, en lugar de disminuir, la resistencia de la aleación de titanio.

12-11 Las aleaciones con memoria de forma [AMF]

El **efecto de memoria de forma** es una propiedad única que tienen algunas aleaciones que son sometidas a la reacción martensítica. Estas aleaciones pueden ser procesadas por medio de un tratamiento termomecánico de alta tecnología para producir una estructura martensítica. Al final del proceso de tratamiento, el material se deforma en una forma predeterminada. En consecuencia, el metal se puede deformar en una segunda forma, pero cuando se incrementa la temperatura el metal vuelve a su forma original. Los frenos de ortodoncia, los filtros de coágulos, motores, monturas para lentes, así como activadores para sistemas inteligentes, se han perfeccionado con base en el empleo de estos materiales. Se han inventado aletas que cambian la dirección de la corriente de viento, que dependen de la temperatura, para aplicarlas en acondicionadores de aire.

Más recientemente también se ha inventado una clase especial de materiales conocida como aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma. Ejemplos de aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma son los Ni_2MnGa, Fe-Pd y Fe_3Pt. A diferencia del Ni-Ti, estos materiales muestran un efecto con memoria de forma en respuesta a un campo magnético. Casi todas las aleaciones con memoria de forma que incluyen Ni-Ti no son ferromagnéticas. Ya se vio en el capítulo 6 que muchos polímeros son viscoelásticos, y el componente viscoso se recupera con el tiempo. De este modo, ¡muchos polímeros tienen memoria de su forma! Recientemente, investigadores han inventado nuevos plásticos con memoria de forma.

Las aleaciones con memoria de forma exhiben una memoria que puede ser activada por esfuerzo o cambio de temperatura. Los **materiales inteligentes** son aquellos que "sienten" un estímulo externo (por ejemplo esfuerzo, cambio de temperatura, campo magnético, etc.) y experimentan algún tipo de cambio. En forma activa, los materiales inteligentes pueden incluso iniciar una respuesta (es decir, funcionan como sensor y activador). Las aleaciones con memoria de forma son una familia de materiales pasivamente inteligentes en que sólo captan un cambio en esfuerzo o en temperatura.

Las aleaciones con memoria de forma también muestran un comportamiento **superelástico**. Son posibles deformaciones recuperables de hasta 10%. Esta es la razón por la cual estas aleaciones se han empleado de manera tan satisfactoria en aplicaciones como alambres de frenos para ortodoncia y monturas para lentes. En estas aplicaciones se usa el efecto superelástico (y no el de la memoria de forma).

Ejemplo 12-10 *Diseño de un cople para tubería*

A veces, en la práctica es necesario unir tubería de titanio. Diseñe un método para hacerlo rápidamente.

SOLUCIÓN

El titanio es bastante reactivo y, a menos que se utilicen procesos especiales de soldadura, puede contaminarse. En la práctica, es posible que no tenga acceso a estos procesos; por lo tanto, debe hacer la unión sin recurrir a procesos de alta temperatura.

Puede aprovechar el efecto de memoria de forma para realizar esta aplicación (figura 12-29). Con anticipación puede colocar un cople de Ni-Ti en un pequeño diámetro, y luego deformarlo en un diámetro más grande en estado martensítico. En la práctica, el cople, que está en estado martensítico, se desliza sobre la tubería y se calienta (a una temperatura suficientemente baja como para que el tubo de titanio no se contamine). El cople se contrae de nuevo a su forma predeterminada como resultado del efecto de memoria de forma, lo que produce una unión mecánica fuerte para unir los tubos.

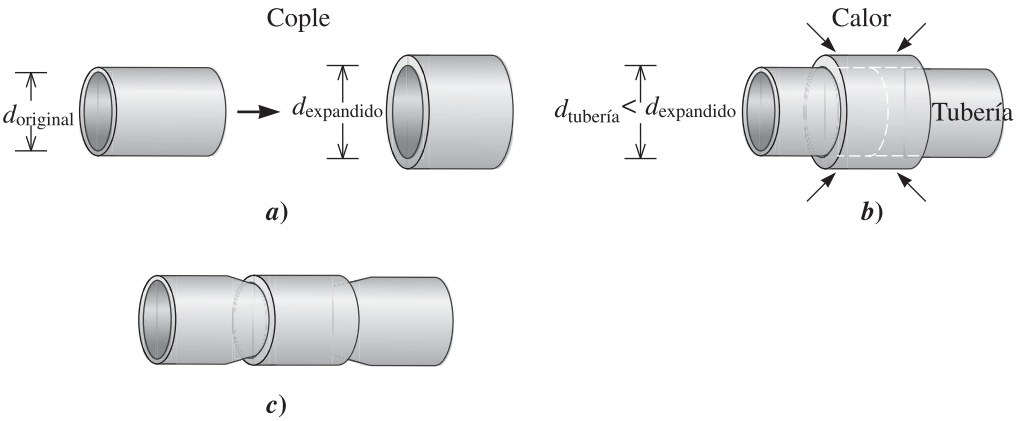


Figura 12-29 Uso de aleaciones con memoria de forma para acoplar tuberías: un cople de aleación de memoria se expande *a*) para que ajuste sobre el tubo, *b*) cuando el cople se vuelve a calentar, se encoge de nuevo a su diámetro original, *c*) apretando la tubería para obtener un ajuste hermético (para el ejemplo 12-10).

Resumen

- Las transformaciones de fase de estado sólido, que tienen un profundo efecto en la estructura y propiedades de un material, pueden ser controladas por medio de tratamientos térmicos apropiados. Estos tratamientos térmicos están diseñados para obtener una distribución óptima de dos o más fases en la microestructura. El endurecimiento por dispersión permite obtener una amplia variedad de estructuras y propiedades.
- Por lo general, estas transformaciones requieren formación de núcleos y crecimiento de nuevas fases a partir de la estructura original. La cinética de la transformación de fase ayuda a entender los mecanismos que controlan la reacción y la rapidez a la que ocurre la reacción, lo cual hace posible diseñar el tratamiento térmico para producir la microestructura deseada. La consulta de diagramas apropiados de fases también ayuda a seleccionar las composiciones y temperaturas necesarias.
- El endurecimiento por envejecimiento, o endurecimiento por precipitación, es un poderoso método para controlar el óptimo endurecimiento por dispersión en muchas aleaciones metálicas. En el endurecimiento por envejecimiento, un muy fino precipitado coherente ampliamente disperso se deja precipitar por medio de un tratamiento térmico que incluye *a*) un tratamiento para producir una solución sólida de una sola fase, *b*) templado para retener esa fase única y *c*) envejecimiento para permitir que se forme un precipitado. Para que ocurra el endurecimiento por envejecimiento, el diagrama de fases debe mostrar solubilidad decreciente del soluto en el solvente cuando disminuye la temperatura.
- La reacción eutectoide puede ser controlada para permitir que un tipo de sólido se transforme en dos tipos diferentes de sólido. La cinética de la reacción depende de la formación de núcleos de las nuevas fases sólidas, así como de la difusión de los distintos átomos del material, para permitir el crecimiento de las nuevas fases.
- La reacción eutectoide de más amplio uso ocurre al producir aceros a partir de aleaciones de hierro y carbono. Se pueden producir ya sea perlita o bainita como resultado de la reacción eutectoide en el acero. Además, pueden estar presentes ferrita primaria o cementita primaria, lo cual depende del contenido de carbono en la aleación.
- Los factores que influyen en las propiedades mecánicas del microconstituyente que produce la reacción eutectoide incluyen *a*) la composición de la aleación (cantidad de microconstituyente eutectoide), *b*) el tamaño de grano del sólido original, el microconstituyente eutectoide, y cualesquiera microconstituyentes primarios, *c*) la finura de la estructura dentro del microconstitu-

yente eutectoide (separación entre láminas), *d*) la velocidad de enfriamiento durante la transformación de fase, así como *e*) la temperatura a la que ocurre la transformación (la cantidad de subenfriamiento).

- Ocurre una reacción martensítica sin difusión de largo alcance. De nuevo, la transformación mejor conocida ocurre en aceros:
  - La cantidad de martensita que se forma depende de la temperatura de la transformación (una reacción atérmica).
  - La martensita es muy dura y frágil, cuya dureza está determinada, principalmente, por el contenido de carbono.
  - La cantidad y composición de la martensita son las mismas que las de la austenita de la cual se forma.
- La martensita se puede revenir. Durante el revenido, se produce una estructura endurecida por dispersión. En aceros, el revenido reduce la resistencia y dureza pero mejora la ductilidad y tenacidad.
- Dado que se obtienen propiedades óptimas por medio de un tratamiento térmico, se debe recordar que la estructura *y* propiedades pueden cambiar cuando se usa el material a altas temperaturas, o se expone a éstas. Cuando el material se pone en servicio, ocurre un exceso de envejecimiento o un exceso de revenido, como extensión natural de los fenómenos que gobiernan estas transformaciones.
- Las aleaciones con memoria de forma (por ejemplo, Ni-Ti) son una clase de materiales inteligentes que pueden recordar su forma. También exhiben un comportamiento superelástico.

Glosario

Aceros que se pueden endurecer en horno Aceros que pueden presentar un incremento de su esfuerzo a la fluencia como resultado del endurecimiento por precipitación que puede ocurrir a temperaturas relativamente bajas (~100°C), condiciones que simulan el horneado de pinturas en automóviles. Este incremento adicional conduce a una mejor resistencia contra las abolladuras.

Ángulo diedro Ángulo que define la forma de una partícula de precipitado en la matriz. El ángulo diedro está determinado por las energías relativas superficiales, la energía de límite del grano de la matriz, así como por la energía interfacial de la matriz-precipitado.

Austenita Nombre dado a la estructura cristalina CCCa del hierro y aleaciones de hierro y carbono.

Bainita Microconstituyente de dos fases, que contiene ferrita y cementita, que se forma en aceros que están transformados de manera isotérmica a temperaturas relativamente bajas.

Cementita Compuesto de Fe_3C duro, quebradizo, semejante a la cerámica que, cuando se dispersa de forma apropiada, proporciona un reforzamiento a los aceros.

Comportamiento superelástico Gran deformación elástica reversible que ocurre como resultado de una transformación martensítica.

Diagrama de tiempo-temperatura-transformación [TTT] El diagrama TTT describe el tiempo necesario a cualquier temperatura para que una transformación de fase inicie y termine. El diagrama TTT supone que la temperatura es constante durante la transformación.

Efecto de memoria de forma Capacidad de ciertos materiales para desarrollar microestructuras que, después de ser deformadas, pueden regresar el material a su forma inicial cuando se calientan (por ejemplo, aleaciones de Ni-Ti).

Endurecimiento por envejecimiento Tratamiento térmico especial por endurecimiento por dispersión. Por tratamiento por solución, templado y envejecimiento, se forma un precipitado coherente que proporciona un efecto considerable de endurecimiento. (También conocido como endurecimiento por precipitación.)

Endurecimiento por precipitación Vea Endurecimiento por envejecimiento.

Energía de deformación Energía necesaria para permitir que un precipitado se ajuste en la matriz circundante durante la formación de núcleos y crecimiento del precipitado.

Energía interfacial Energía asociada con el límite entre dos fases.

Envejecimiento artificial Recalentamiento de una aleación tratada por solución y templada a una temperatura debajo de solvus, con el fin de proporcionar la energía térmica necesaria para que se forme un precipitado.

Envejecimiento natural Cuando un precipitado coherente se forma a partir de una aleación que se puede endurecer por envejecimiento, tratada por solución y templada, a temperatura ambiente, produce un endurecimiento óptimo.

Estructura Widmanstätten La precipitación de una segunda frase desde la matriz cuando hay una relación fija cristalográfica entre el precipitado y las estructuras cristalinas de la matriz. En la estructura Widmanstätten es frecuente que se formen estructuras semejantes a agujas o placas.

Ferrita Nombre dado a la estructura cristalina CCCu del hierro que puede ocurrir como α o δ. No debe confundirse con ferritas de cerámica, que son materiales magnéticos.

Martensita Fase metaestable formada en aceros y otros materiales por transformación atérmica y sin difusión.

Materiales inteligentes Materiales que pueden detectar un estímulo externo (por ejemplo esfuerzo, presión, cambio de temperatura, campo magnético, etc.) e iniciar una respuesta. Los materiales pasivamente inteligentes pueden captar estímulos externos; los materiales activamente inteligentes tienen capacidad sensorial y de actuación.

Nitinol Aleación de níquel-titanio con memoria de su forma.

Perlita Microconstituyente laminar de dos fases, que contiene ferrita y cementita, que se forma en aceros enfriados en forma normal o transformados de manera isotérmica a temperaturas relativamente altas.

Precipitado coherente Precipitado con una estructura cristalina y distribución atómica que tiene una relación continua con la matriz de la cual se forma el precipitado. El precipitado coherente proporciona una excelente disrupción de la distribución atómica de la matriz y produce un excelente endurecimiento.

Relación de Avrami Describe la fracción de una transformación que ocurre como función del tiempo. En pocas palabras, describe casi todas las transformaciones de estado sólido que involucran difusión; en consecuencia, no se describen transformaciones martensíticas.

Solución sólida sobresaturada Solución sólida que se forma cuando un material es enfriado rápidamente, desde una región de alta temperatura y una sola fase a una región de baja temperatura y dos fases, sin que se precipite la segunda fase. Como la fase de templado contiene más elemento de aleación que el límite de solubilidad, está sobresaturada de ese elemento.

Revenido Tratamiento térmico que se emplea para reducir la dureza de la martensita, pues permite que esta se descomponga en las fases de equilibrio y conduce a obtener mayor tenacidad.

Transformación atérmica Cuando la cantidad de la transformación depende sólo de la temperatura, no del tiempo (igual que la transformación martensítica o transformación displasiva).

Transformación displasiva Transformación de fase que ocurre por medio de pequeños desplazamientos de átomos o de iones y sin difusión. Es igual que la transformación atérmica o martensítica.

Transformación isotérmica Cuando la cantidad de una transformación a una temperatura específica depende del tiempo permitido para la transformación.

Transformación martensítica Transformación de fase que ocurre sin difusión. Igual que la transformación atérmica o displasiva.

Tratamiento por solución Primer paso en el tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento. La aleación se calienta por encima de la temperatura de solvus para disolver cualquier segunda fase y producir una estructura homogénea de una sola fase.

Zonas de Guinier-Preston Grupos de átomos que se precipitan de la matriz en las primeras etapas del proceso de endurecimiento por envejecimiento. Aun cuando las zonas GP son coherentes con la matriz, son demasiado pequeñas para producir un endurecimiento óptimo.

Problemas

Sección 12-1 Formación de núcleos y crecimiento en reacciones en estado sólido

12-1 *a*) Determine el tamaño crítico del núcleo r^* de la nucleación homogénea, de la precipitación de la fase β en una matriz de fase α. *Sugerencia*: El tamaño crítico de núcleos ocurre en el máximo de la expresión para $\Delta G(r)$ en la ecuación 12-1. *b*) Grafique el cambio ΔG total de energía

libre como función del radio del precipitado. *c*) Comente sobre el valor de r^* de la nucleación homogénea de precipitación en estado sólido cuando se compare con la transformación de líquido a sólido.

12-2 ¿Cómo difiere la ecuación de la formación de núcleos de una fase en estado sólido, respecto de aquella de una transformación de líquido a sólido?

12-3 Determine las constantes c y n de la ecuación 12-2 que describen la rapidez de cristalización del polipropileno a 140°C. (Vea la figura 12-30.)

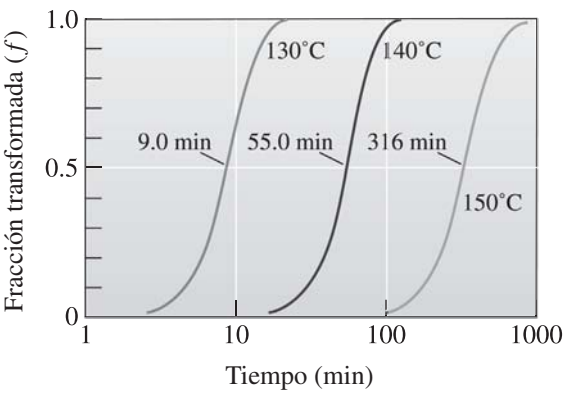


Figura 12-30 Efecto de la temperatura en la cristalización del polipropileno (problemas 12-3 y 12-5).

12-4 Determine las constantes c y n de la ecuación 12-2 que describen la rapidez de recristalización del cobre a 135°C. (Vea la figura 12-2.)

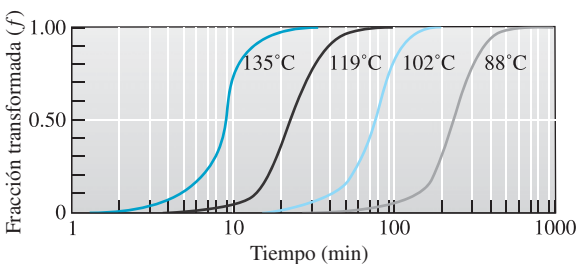


Figura 12-2 Efecto de la temperatura en la recristalización del cobre trabajado en frío. (Repetida para el problema 12-4.)

12-5 Determine las constantes c y n de la ecuación 12-2 que describen la rapidez de cristalización del polipropileno a 150 °C. (Vea la figura 12-30.)

12-6 ¿Cuáles serían los valores de c y n en la ecuación 12-2 para una muestra CCCa con un tiempo de incubación de 10 segundos que se transforma completamente a 3.5×10^4 s?

12-7 Elabore una gráfica que muestre el tiempo necesario para 50% de recristalización en función de la temperatura de recocido del cobre trabajado en frío. (Remítase a la figura 12-2 para obtener los datos.)

12-8 La mayoría de las transformaciones de fase en estado sólido siguen la ecuación de Avrami. ¿Verdadero o falso? Explique brevemente.

12-9 ¿Qué paso controla la rapidez de recristalización de un metal trabajado en frío?

Sección 12-2 Aleaciones endurecidas cuando exceden el límite de solubilidad

12-10 ¿Cuáles son las diferentes formas por la cuales se puede hacer que una segunda fase se precipite en una microestructura de dos fases?

12-11 Explique por qué la segunda fase en aleaciones de Al-4% Cu forma núcleos y crece a lo largo de límites de granos cuando se enfría lentamente. Por lo general, ¿es deseable este proceso?

12-12 ¿Qué significan los términos precipitados "coherentes" e "incoherentes"?

12-13 ¿Qué propiedades de la fase del precipitado son necesarias para endurecer la precipitación? ¿Por qué?

12-14 La electromigración, es decir, una difusión de átomos/iones debida a la transferencia de cantidad de movimiento desde electrones de alta energía genera interconexiones de huecos del aluminio empleados en numerosos procesos de metalización de semiconductores, por lo cual es una causa principal de problemas de confiabilidad de los dispositivos en la industria. Proponga un aditivo para el Al que pueda ayudar a mitigar este problema. Consulte el diagrama apropiado de fases para apoyar sus respuestas.

12-15 ¿En qué ángulo diedro la energía interfacial del límite entre los granos de la matriz y el precipitado serán iguales?

12-16 ¿Cuál es la relación entre la energía superficial interfacial del límite matriz-precipitado y la energía de límite del grano de la matriz cuando se forma un tetraedro?

12-17 Un compuesto de aluminio de 45.7 kg contiene 35% P de una aleación CuAl. La temperatura intermedia entre los límites superior e inferior de la región de fases $L + \eta$ se encuentra en esta composición. ¿Cuánto aluminio se debe añadir y cuánto se debe enfriar la mezcla líquida resultante para alcanzar el punto eutéctico? (Vea la figura 12-5.)

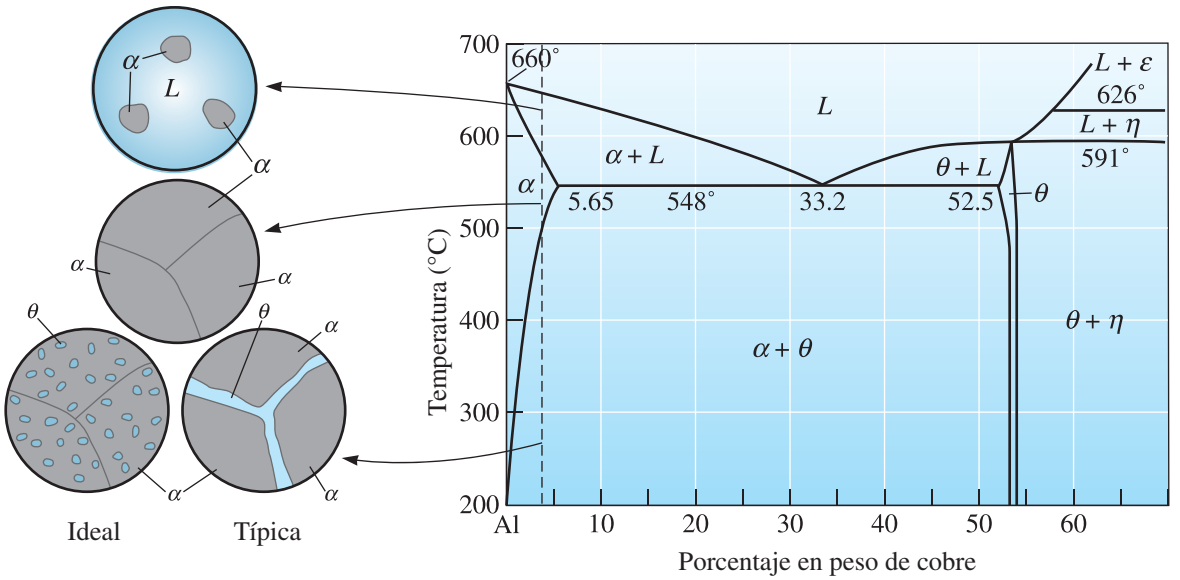


Figura 12-5 Diagrama de fases de aluminio-cobre y microestructuras que pueden desarrollarse durante el enfriamiento de una aleación de Al-4% Cu. (Repetida para el problema 12-17.)

Sección 12-3 Endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

12-18 ¿Cuál es el principio del endurecimiento por precipitación?

12-19 ¿Cuál es la diferencia entre endurecimiento por precipitación y endurecimiento por dispersión?

12-20 ¿Qué es una solución sobresaturada? ¿Cómo se obtienen soluciones sobresaturadas durante el endurecimiento por precipitación? ¿Por qué es necesaria la formación de una solución sobresaturada?

12-21 ¿Por qué los precipitados formados durante el endurecimiento por precipitación se forman en toda la microestructura y no sólo en los límites de granos?

12-22 En envejecimiento durante tiempos más largos, ¿por qué crecen los precipitados de segunda fase? ¿Cuál es su fuerza motriz? Compare esto con las fuerzas motrices para el crecimiento de granos y sinterización en estado sólido.

Sección 12-4 Aplicaciones de aleaciones endurecidas por envejecimiento

12-23 ¿Por qué el endurecimiento por precipitación es un mecanismo atractivo de endurecimiento para materiales de aeronaves?

12-24 ¿Por qué casi todas las aleaciones endurecidas por precipitación son apropiadas sólo para aplicaciones a baja temperatura?

12-25 ¿Por qué algunos de los sistemas de aleaciones que muestran solubilidad sólida decreciente y que son candidatos para el endurecimiento por envejecimiento no son empleados comercialmente?

Sección 12-5 Evolución microestructural en endurecimiento por envejecimiento o por precipitación

12-26 Explique los tres pasos básicos que se deben dar durante el endurecimiento por precipitación.

12-27 Explique cómo puede ocurrir la fragilidad en caliente de aleaciones endurecidas por precipitación.

12-28 En el endurecimiento por precipitación, ¿la fase que produce el endurecimiento se forma directamente de la fase sobresaturada de matriz? Explique su respuesta.

12-29 *a*) Recomiende un tratamiento térmico para el endurecimiento por envejecimiento artificial de una aleación de Cu-1.2% Be. (Vea la figura 12-31.) Incluya temperaturas apropiadas.

b) Compare la cantidad del precipitado γ_2 que se forma por envejecimiento artificial a 400°C con la cantidad de precipitado que se forma por envejecimiento natural.

12-30 Suponga que el endurecimiento por envejecimiento es posible en el sistema Al-Mg. (Vea la figura 12-10.)

a) Recomiende un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento artificial para cada una de las siguientes aleaciones, y

b) compare la cantidad del precipitado β que se forma después del tratamiento de cada aleación: i) Al-4% Mg, ii) Al-6% Mg, iii) Al-12% Mg.

c) Pruebas de la aleación efectuadas después del tratamiento térmico revelan que ocurre un pequeño endurecimiento como resultado

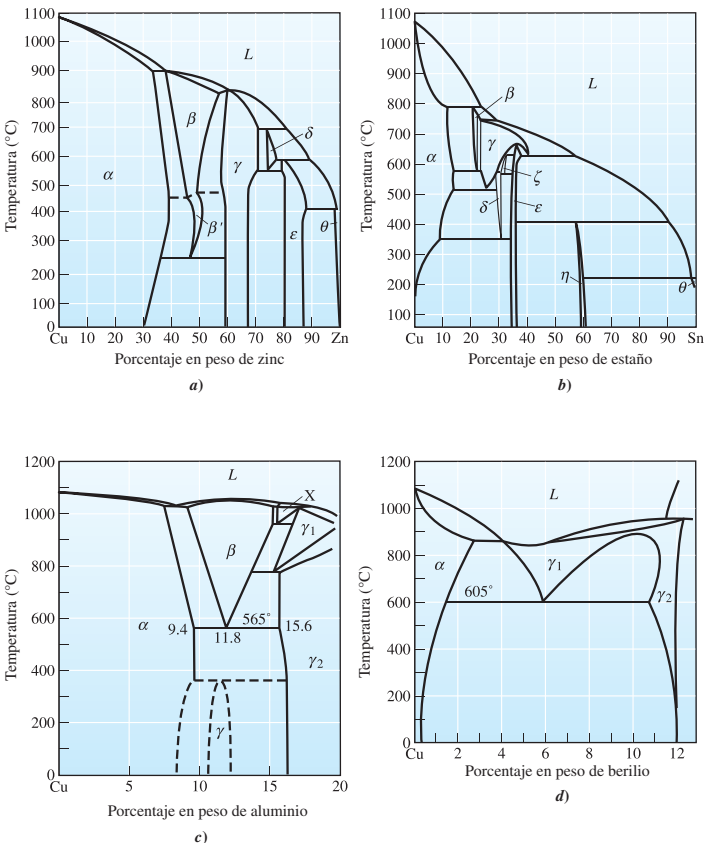


Figura 12-31 Diagramas binarios de fases de los sistemas de *a*) cobre-zinc, *b*) cobre-estaño, *c*) cobre-aluminio y *d*) cobre-berilio (problemas 12-29 y 12-74).

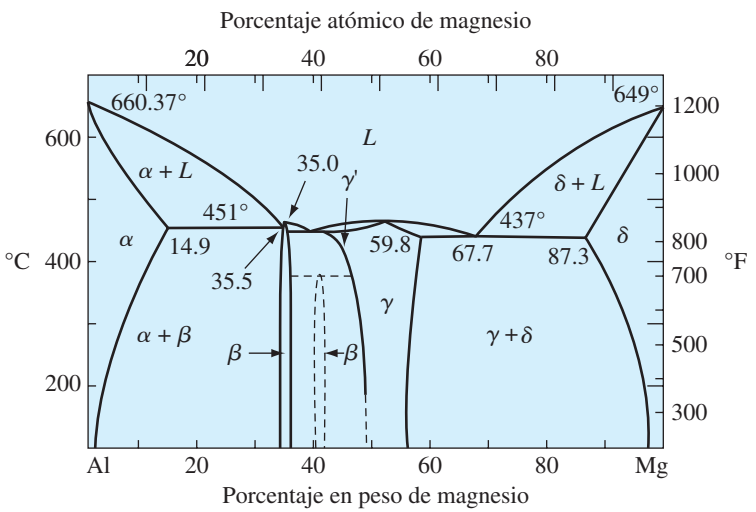


Figura 12-10 Diagrama de fases de aluminio-magnesio. (Repetida para el problema 12-30.)

de dicho tratamiento térmico. ¿Cuáles de los requerimientos del endurecimiento por envejecimiento no fueron satisfechos?

12-31 Una solución de Al-2.5% Cu es creada por solución, templada y envejecida en exceso a 230°C para producir una microestructura estable. Si la θ se precipita como esferas con un diámetro de 9000 Å y una densidad de 4260 kg/m^3, determine el número de partículas de precipitado por cm^3. (Vea la figura 12-5.)

12-32 Examine la figura 12-10 e identifique las fases que estarán presentes en cada etapa si se sigue

la ruta del proceso de (500°C, 20 %P de Mg) a (500°C, 80%P de Mg) a (200°C, 80 % de Mg).

12-33 Examine el diagrama de fases de Mg-Pb. ¿Una aleación de Mg −20 %P de Pb sería candidata para endurecimiento por envejecimiento? Explique su respuesta. (Vea la figura 12-32.)

Sección 12-6 Efectos de la temperatura y del tiempo de envejecimiento

12-34 ¿Qué es envejecimiento? ¿Por qué es necesario este paso en el endurecimiento por precipitación?

12-35 ¿Qué es exceso de envejecimiento?

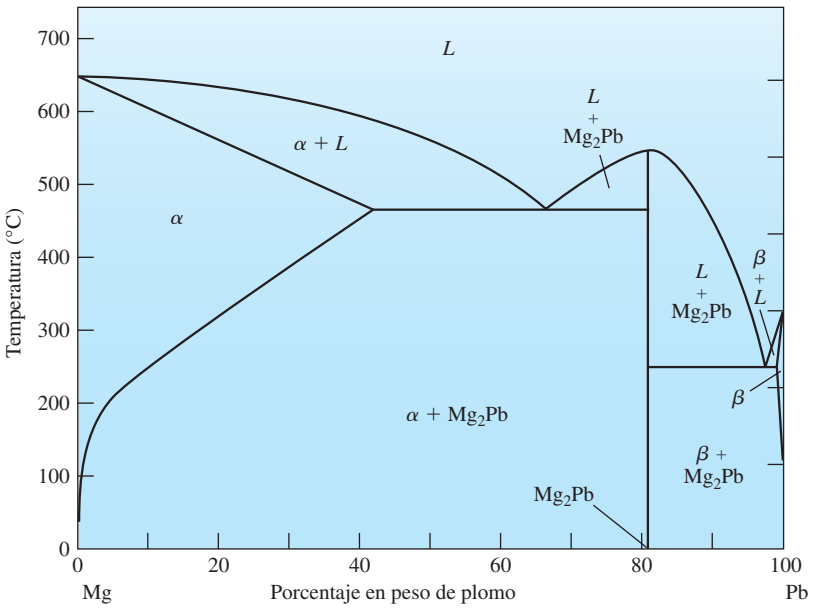


Figura 12-32 Diagrama de fases de Mg-Pb (problema 12-33).

12-36 ¿Qué significan los términos "envejecimiento natural" y "envejecimiento artificial"?

12-37 En el avión en el que volaron los hermanos Wright, ¿cómo se endureció por precipitación la aleación?

12-38 ¿Por qué el trabajo del doctor Gayle y sus colegas reveló dos conjuntos de precipitados en la aleación que se usó para fabricar el avión de los hermanos Wright?

12-39 Explique por qué se requiere un tiempo mayor para llegar a la máxima dureza a baja temperatura de envejecimiento.

12-40 Especule sobre las razones por las que se requiere más tiempo para alcanzar la dureza máxima a menores temperaturas de envejecimiento.

12-41 Con base en los principios de endurecimiento por envejecimiento de aleaciones de Al-Cu, clasifique las siguientes aleaciones de Al-Cu de la más alta a la más baja resistencia a la fluencia máxima, así como el tiempo, del más largo al más corto, necesario a 190°C para alcanzar la máxima resistencia a la fluencia: Al-2 %p de Cu, Al-3 %p de Cu y Al-4 %p de Cu. Consulte los diagramas de fases de Al-Cu (Vea la figura 12-9.)

12-42 ¿Cuáles técnicas de análisis emplearía usted para caracterizar los precipitados a nanoescala de una aleación?

12-43 ¿Por qué se tienen que conservar algunas aleaciones de aluminio a bajas temperaturas hasta que estén listas para los pasos de su formación?

Sección 12-7 Requisitos para endurecer por envejecimiento

12-44 ¿Todas las composiciones de una aleación pueden ser reforzadas por medio de endurecimiento por precipitación? ¿Es posible usar este mecanismo para endurecer cerámicas, vidrios o polímeros?

12-45 Se debe fabricar un alambre de cobre conductor. ¿Seleccionaría usted el endurecimiento por precipitación como una forma para reforzar este alambre? Explique su respuesta.

12-46 La figura 12-33 muestra un diagrama hipotético de fases. Determine si cada una de las siguientes aleaciones podría ser buena candidata para endurecimiento por envejecimiento y explique su respuesta. En el caso de las aleaciones que podrían ser buenas candidatas, describa el tratamiento térmico necesario, incluyendo temperaturas recomendadas.

a) *A*-10% *B*;
b) *A*-20% *B*;
c) *A*-55% *B*;
d) *A*-87% *B*; y
e) *A*-95% *B*.

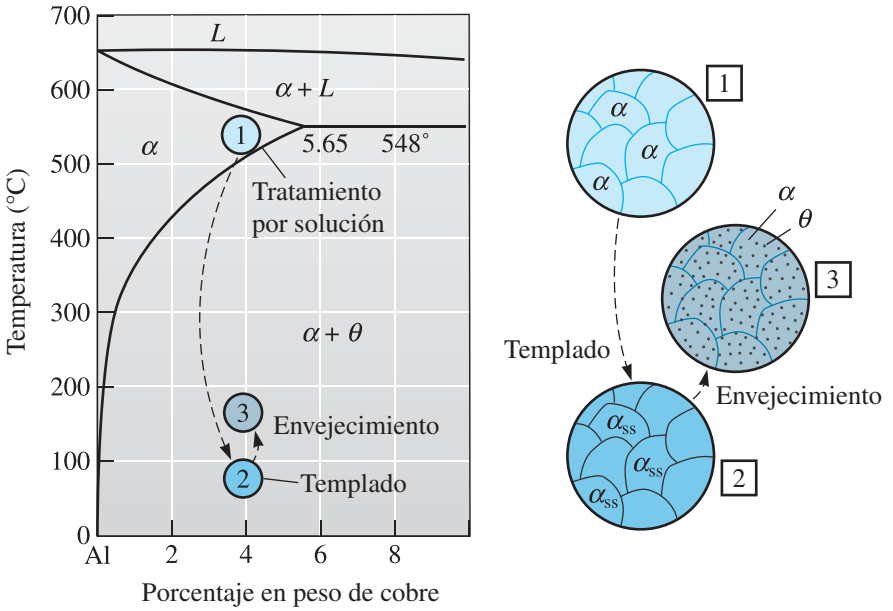


Figura 12-9 Diagrama de un extremo rico en aluminio de la fase aluminio-cobre, que muestra los tres pasos del tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento y las microestructuras que se producen. (Repetida para el problema 12-41.)

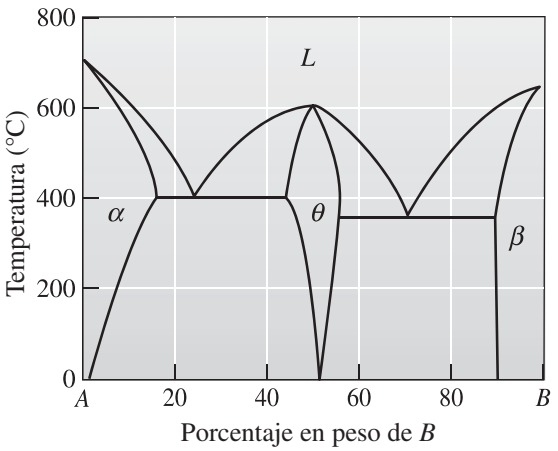


Figura 12-33 Diagrama hipotético de fases (problema 12-46).

Sección 12-8 Uso de aleaciones que pueden endurecerse por envejecimiento a altas temperaturas

12-47 ¿Cuál es la principal limitación del uso de aleaciones endurecidas por precipitación?

12-48 ¿Por qué ciertas aleaciones de aluminio (no basadas en níquel), reforzadas usando endurecimiento por envejecimiento, pueden perder su resistencia cuando son soldadas?

12-49 ¿Escogería usted una aleación endurecida por precipitación para fabricar un bate de béisbol de aleación de aluminio?

12-50 ¿Qué tipo de aleaciones endurecidas por dispersión pueden retener su resistencia hasta ~1000°C?

Sección 12-9 La reacción eutectoide

12-51 Escriba la reacción eutectoide del sistema Fe-Fe_3C.

12-52 Trace la microestructura de la perlita formada por enfriamiento lento de un acero con la composición eutectoide.

12-53 Compare y contraste las reacciones eutécticas y eutectoides.

12-54 Dibuje la porción eutectoide del diagrama de fases de Fe-Fe_3C. Asegúrese de indicar todas las composiciones y temperaturas, así como de escribir las reacciones relevantes.

12-55 Dibuje la porción peritéctica del diagrama de fases de Fe-Fe_3C. Asegúrese de indicar todas las composiciones y temperaturas, así como de escribir las reacciones relevantes.

12-56 ¿Cuáles son las solubilidades de carbono en las formas α, δ y γ del hierro?

12-57 Defina los siguientes términos: ferrita, austenita, perlita y cementita.

12-58 La microestructura de la perlita es semejante a un nanocompuesto de cerámica-metal. ¿Cierto o falso? Explique su respuesta.

12-59 ¿Qué significan los términos aceros "hipoeutectoide" e "hipereutectoide"?

12-60 ¿Cuál es la diferencia entre un microconstituyente y una fase?

12-61 La austenita y Fe_3C están en equilibrio a 1000°C y 3 %p de C. ¿Cuál es el porcentaje en peso de carburo de hierro en la aleación de dos fases?

12-62 En el caso de una aleación de Fe-0.35% C, determine

a) la temperatura a la que la austenita comienza primero a transformarse cuando se enfría;
b) el microconstituyente primario que se forma;
c) la composición y cantidad de cada fase presente a 728°C;
d) la composición y cantidad de cada fase presente a 726°C, y
e) la composición y cantidad de cada microconstituyente presente a 726°C.

12-63 En el caso de una aleación de Fe-1.15% C, determine

a) la temperatura a la que la austenita comienza primero a transformarse cuando se enfría;
b) el microconstituyente primario que se forma;
c) la composición y cantidad de cada fase presente a 728°C;
d) la composición y cantidad de cada fase presente a 726°C, y
e) la composición y cantidad de cada microconstituyente presente a 726°C.

12-64 Un acero contiene 8% de cementita y 92% de ferrita a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?

12-65 Un acero contiene 18% de cementita y 82% de ferrita a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?

12-66 Un acero contiene 18% de perlita y 82% de ferrita primaria a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?

12-67 Un acero contiene 94% de perlita y 6% de cementita primaria a temperatura ambiente. Estime el contenido de carbono del acero. ¿El acero es hipoeutectoide o hipereutectoide?

12-68 Un acero contiene 55% α y 45% γ a 750°C. Estime el contenido de carbono del acero.

12-69 Un acero contiene 96% γ y 4% de Fe_3C a 800°C. Estime el contenido de carbono del acero.

12-70 Un acero es calentado hasta que se forma 40% de austenita, con un contenido de carbono de 0.5%. Estime la temperatura y el contenido total de carbono del acero.

12-71 Un acero se calienta hasta que se forma 85% de austenita, con un contenido de carbono de 1.05%. Estime la temperatura y el contenido total de carbono del acero.

12-72 Los aceros al carbono citados en la tabla siguiente se calentaron a 1000°C durante una hora para formar austenita y se enfriaron lentamente, bajo condiciones de equilibrio, a temperatura ambiente.

Consulte el diagrama de fases de Fe-Fe_3C para contestar las preguntas sobre cada una de las composiciones de acero al carbono citadas en la tabla siguiente.

a) Determine las cantidades de las fases presentes;
b) determine el contenido de C de cada fase, y
c) grafique el contenido de C de perlita, α y Fe_3C contra la resistencia a la fluencia. Con base en la gráfica, exponga los factores que influyen en la resistencia a la fluencia en aceros con $< 1\%$ C.

Porcentaje de carbono	Resistencia a la fluencia (MPa)
0.2	295
0.4	353
0.6	372
0.8	376
0.95	379

12-73 Un termocople defectuoso en un horno para tratamiento térmico carburizante provoca mediciones no confiables de la temperatura durante el proceso. El análisis de la microestructura del acero carburizado que inicialmente contenía 0.2% de carbono dejó ver que la superficie tenía 93% de perlita y 7% de Fe_3C primaria, mientras que, a una profundidad de 5 mm, los microconstituyentes fueron de 99% perlita y 1% Fe_3C primaria. Estime la temperatura a la que se realizó el tratamiento térmico, si el tratamiento térmico carburizante se realizó durante cuatro horas. Para la difusión intersticial del carbono en hierro CCCa, el coeficiente de difusión $D_0 = 2.3 \times 10^{-5}$ m^2/s y la energía de activación $Q = 1.38 \times 10^{-5}$ J/mol. Puede ser útil consultar las secciones 5-6 y 5-8.

12-74 Determine la temperatura eutectoide, la composición de cada fase de la reacción eutectoide, y la cantidad de cada fase presente en el microconstituyente eutectoide de los siguientes sistemas. En el caso de los sistemas metálicos, comente si se espera que el microconstituyente eutectoide sea dúctil o quebradizo.

a) ZrO_2-CaO. (Vea la figura 12-34.)
b) Cu-Al a 11.8% Al. [Vea la figura 12-31*c*).]
c) Cu-Zn a 47% Zn. [Vea la figura 12-31*a*).]
d) Cu-Be. [Vea la figura 12-31*d*).]

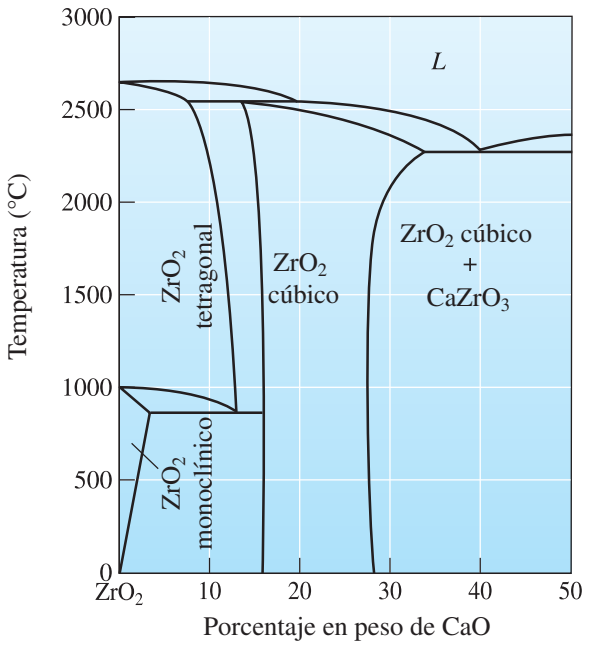


Figura 12-34 Parte del diagrama de fases del ZrO_2-CaO. Ocurre una transformación polimórfica de fases en el ZrO_2 puro. Si se agrega de 16 a 26% de CaO se produce una sola fase de zirconio puro a todas las temperaturas (problema 12-74).

Sección 12-10 Control de la reacción eutectoide

12-75 ¿Por qué, por lo general, las distancias entre laminillas, formadas en una reacción eutectoide están separadas por distancias menores a las formadas en las reacciones eutécticas?

12-76 Compare la separación entre láminas y la resistencia a la fluencia cuando un acero eutectoide se transforma isotérmicamente en perlita a
a) 700°C y
b) 600°C.

12-77 ¿Por qué un acero eutectoide exhibe diferentes límites elásticos y porcentajes de elongaciones, dependiendo de que se enfríe lenta o relativamente rápido?

12-78 Grafique las resistencias a la fluencia y a la tensión de la razón de perlita gruesa a fina como una función de la composición del carbono con base en la tabla 12-1.

12-79 Las ferritas eutectoide y proeutectoide existen en el acero hipoeutectoide. Explique sus diferencias. ¿Cuál es la concentración de carbono en cada una de ellas?

12-80 ¿Qué es un diagrama TTT?

12-81 Trace y marque claramente las diferentes partes de un diagrama TTT de un acero al carbono simple con 0.77% de carbono.

12-82 En el diagrama TTT, ¿cuál es la diferencia entre las fases γ y γ_u?

12-83 ¿Por qué la bainita y la perlita no aparecen en el diagrama del Fe-Fe_3C? ¿Estas son fases o microconstituyentes?

12-84 ¿Por qué no se puede hacer uso de los diagramas TTT para describir configuraciones de tratamiento térmico, en las que las muestras son enfriadas en un determinado tiempo (es decir, por qué los diagramas TTT son apropiados sólo en el caso de transformaciones isotérmicas)?

12-85 ¿Qué es la bainita? ¿Por qué los aceros que la contienen exhiben niveles más altos de tenacidad?

12-86 Se encuentra que un acero eutectoide isotérmicamente transformado tiene una resistencia a la fluencia de 410 MPa. Estime *a*) la temperatura de transformación y *b*) la separación entre láminas en la perlita.

12-87 Determine la temperatura de transformación que se requiere y el microconstituyente, si un acero eutectoide debe tener los siguientes valores de dureza:
a) DRC 38
b) DRC 42
c) DRC 48
d) DRC 52

12-88 Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800°C durante una hora, templado a 350°C y mantenido así durante 750 s, y finalmente templado a temperatura ambiente.

12-89 Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800°C, templado a 650°C, mantenido así durante 500 s y finalmente templado a temperatura ambiente.

12-90 Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800°C, templado a 300°C y mantenido así durante 10 s y finalmente templado a temperatura ambiente.

12-91 Describa la dureza y la microestructura de un acero eutectoide que ha sido calentado a 800°C, templado a 300°C y mantenido así durante 10 s, templado a temperatura ambiente y luego recalentado a 400°C antes de ser finalmente enfriado otra vez a temperatura ambiente.

12-92 Un acero 1080 fue austenizado a 775°C durante una hora, templado a 550°C hasta que se transformó isotérmicamente a 550°C. ¿Durante cuánto tiempo se debe exponer la austenita a la temperatura de 550°C para completar la transformación? ¿Cuáles son la microestructura y dureza esperadas?

Sección 12-11 La reacción martensítica y el revenido

12-93 ¿Cuál es la principal fuente de endurecimiento durante el tratamiento térmico de los aceros?

12-94 ¿Cuáles son las similitudes y/o diferencias entre los procesos para el endurecimiento por envejecimiento de las aleaciones y del acero?

12-95 ¿Cuál es la diferencia entre transformaciones de fase de estado sólido como la reacción eutectoide y la transformación de fase martensítica?

12-96 ¿Cuál es la diferencia entre transformaciones isotérmicas y atérmicas?

12-97 ¿Qué paso controla la velocidad de transformaciones de fase martensítica?

12-98 ¿Por qué la martensita no aparece en el diagrama de fases de Fe-Fe_3C?

12-99 ¿La martensita en aceros tiene una composición fija? ¿De qué dependen las propiedades de la martensita?

12-100 ¿Pueden ocurrir transformaciones de fase martensítica en otras aleaciones y cerámicas?

12-101 Compare las propiedades mecánicas de la martensita, la perlita y la bainita formadas a partir de una composición de acero eutectoide.

12-102 Un acero que contiene 0.3% C se calienta a varias temperaturas por encima de la temperatura eutectoide, se mantiene así durante una hora y luego se lo templa a temperatura ambiente. Con ayuda de la figura 12-35, determine la cantidad, la composición y la dureza de cualquier martensita que se forme cuando la temperatura de calentamiento sea

a) 728°C
b) 750°C
c) 790°C
d) 850°C

12-103 Un acero que contiene 0.95% C se calienta a varias temperaturas por encima de la temperatura eutectoide, se mantiene así durante una hora y luego se lo templa a temperatura ambiente. Usando la figura 12-35, determine la cantidad y la composición de cualquier martensita que se forme cuando la temperatura de calentamiento sea

a) 728°C
b) 750°C
c) 780°C
d) 850°C

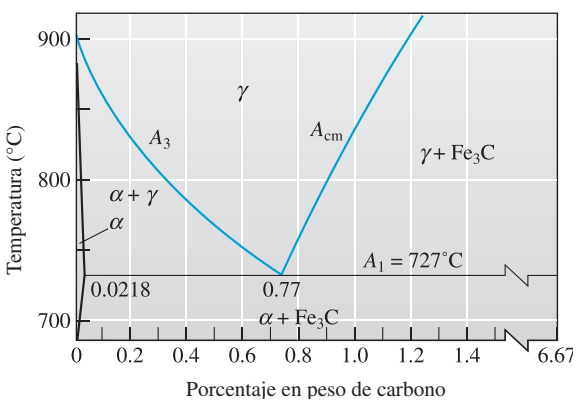


Figura 12-35 Parte eutectoide del diagrama de fases de Fe-Fe_3C (problemas 12-102, 12-103, 12-104 y 12-105).

12-104 Una microestructura de acero contiene 75% de martensita y 25% de ferrita; la composición de la martensita es de 0.6 % C. Usando la figura 12-35 determine

a) la temperatura desde la que se templó el acero y
b) el contenido de carbono del acero.

12-105 Una microestructura de acero contiene 92% de martensita y 8% de Fe_3C; la composición de la martensita es de 1.10% C. Usando la figura 12-35, determine

a) la temperatura desde la que se templó el acero y
b) el contenido de carbono del acero.

12-106 Un acero que contiene 0.8% C es templado para producir sólo martensita. Estime el cambio de volumen que ocurre, suponiendo que el parámetro de red de la austenita es de 3.6 Å. ¿El acero se expande o se contrae durante el templado?

12-107 Describa el tratamiento térmico completo necesario para producir un acero eutectoide templado y revenido que tenga una resistencia a la tensión de por lo menos 125,000 psi. Incluya las temperaturas apropiadas.

12-108 Describa el tratamiento térmico completo necesario para producir un acero eutectoide templado y revenido que tenga una dureza DRC de menos de 50. Incluya las temperaturas apropiadas.

12-109 Por lo general, en aleaciones eutécticas, el microconstituyente eutéctico es el continuo, pero en las estructuras eutectoides lo es el microconstituyente primario. Al describir los cambios que ocurren al disminuir la temperatura en cada reacción, explique por qué se espera esta diferencia.

12-110 ¿Qué es el revenido de aceros? ¿Por qué es necesario este procedimiento?

12-111 ¿Qué fases se forman por la descomposición de la martensita?

12-112 ¿Qué es una martensita revenida?

12-113 Si el revenido provoca la descomposición de la martensita, ¿por qué en primer lugar se debe formar martensita?

12-114 Describa los cambios en las propiedades que ocurren al revenir un acero eutectoide.

Sección 12-12 Las aleaciones con memoria de forma [AMF]

12-115 ¿Cuál es el principio por el cual las aleaciones con memoria de forma presentan un efecto de memoria?

12-116 Proporcione ejemplos de materiales que presenten un efecto de memoria de forma.

12-117 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones de aleaciones con memoria de forma?

Problemas de diseño

12-118 Usted desea unir láminas de aluminio a la estructura del piso 24 de un rascacielos, y piensa usar remaches de este elemento que se pueden endurecer por envejecimiento, pero los remaches deben ser blandos y dúctiles para lograr una unión apretada. Después de unir las láminas, los remaches deben ser muy fuertes. Diseñe un método para producir, usar y reforzar los remaches.

12-119 Diseñe un proceso para producir un polímero de polipropileno con una estructura que sea 75% cristalina. La figura 12-30 le proporcionará los datos apropiados.

12-120 Se utiliza una ménsula de Al-Cu endurecida por envejecimiento para soportar un dispositivo pesado de detección eléctrica fuera de un horno para fabricar acero. Las temperaturas pueden rebasar los 200°C. ¿Es este un buen diseño? Explique. Si no lo es, diseñe una ménsula apropiada y explique por qué su selección es aceptable.

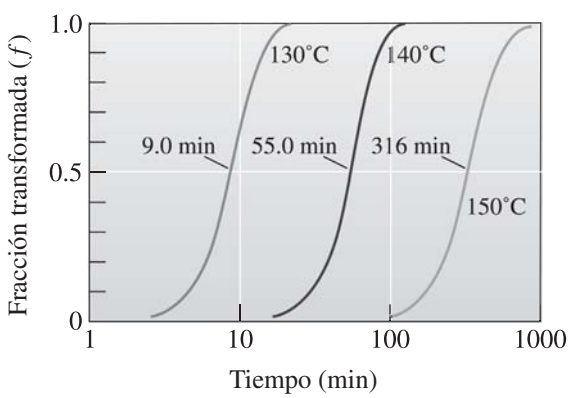


Figura 12-30 Efecto de la temperatura en la cristalización del polipropileno. (Repetida para el problema 12-119.)

12-121 Usted usa un proceso de soldadura por arco para unir un acero eutectoide. Las magnitudes de la velocidad de enfriamiento pueden ser muy altas después del proceso de unión. Describa lo que sucede en el área de la soldadura afectada por el calor y exponga los problemas que pudieran ocurrir. Diseñe un proceso de unión que reduzca al mínimo estos problemas.

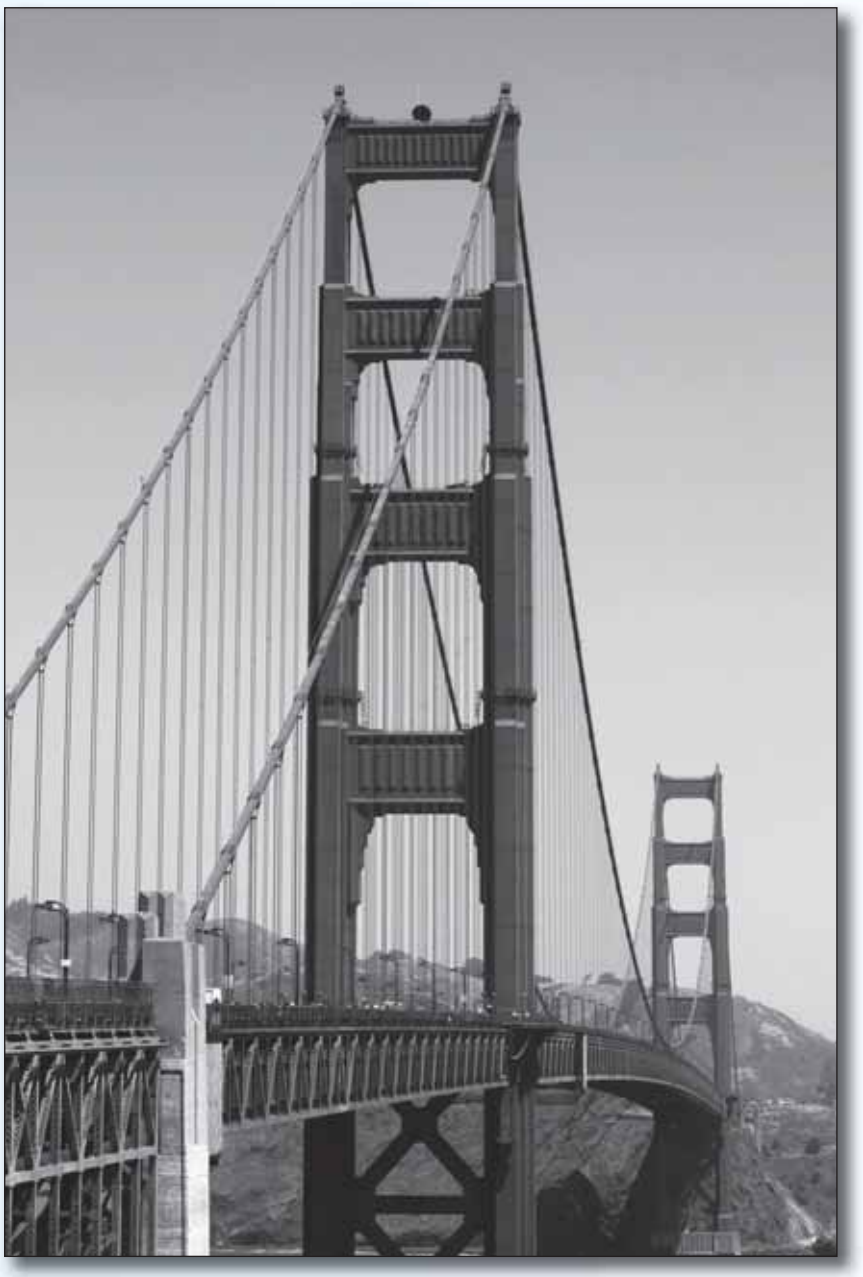
Problemas por computadora

12-122 *Cálculo de fases y microconstituyentes en aceros al carbono simples.* Edite un programa de cómputo que calcule las cantidades de fases, en aceros al carbono simples, en composiciones que vayan de 0 a 1.5% de carbono. Suponga temperatura ambiente para sus cálculos. El programa debe solicitarle al usuario que asigne un valor para la concentración de carbono. El programa debe emplear este dato y proporcionar la cantidad de fases (ferrita, Fe_3C) del acero con base en la regla de la palanca (de modo semejante al ejemplo 12-6). También indicar al usuario (como parte de la salida) si el acero es eutectoide, hipoeutectoide o hipereutectoide. Con base en la composición, el programa también debe señalar las cantidades de microconstituyentes presentes (es decir, cuánta perlita). El programa también debe imprimir un mensaje descriptivo adecuado que describa la microestructura esperada (suponga enfriamiento lento). Por ejemplo, si la composición escogida es la de acero hipoeutectoide, el programa debe generar un mensaje que indique que la microestructura estará formada principalmente por granos α y perlita.

Problemas Knovel[MR]

K12-1 ¿Cuáles son los efectos de los ciclos térmicos en aleaciones de NiTi con memoria de forma (AMF)?

K12-2 Algunas superaleaciones de hierro endurecidas por precipitación se usan para servicio a altas temperaturas. Describa procedimientos de tratamiento térmico empleados para estos aceros.



Los aceros constituyen la familia de materiales que más se usa para aplicaciones estructurales y de soporte de cargas. Casi todos los edificios, puentes, herramientas, automóviles y otras muchas aplicaciones usan aleaciones ferrosas. Mediante diversos tratamientos térmicos que pueden dar una gran variedad de microestructuras y propiedades, los aceros son tal vez la familia más versátil de materiales de ingeniería.

El puente Golden Gate, en California, está hecho de acero pintado para incrementar su resistencia a la corrosión. (El color se conoce como Naranja Internacional.) Cada uno de los cables principales que sostienen el puente sobre la bahía de San Francisco contiene 27,572 alambres, lo que da una longitud total de aproximadamente 129,000 km. (*Henrik Lehnerer/Shutterstock.com*)

CAPÍTULO

13

Tratamiento térmico de aceros y hierros colados

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Cuál es el material de ingeniería de más amplio uso?*
- *¿Qué hace que algunos aceros sean "inoxidables"?*
- *¿Cuál es la diferencia entre hierro colado y acero?*
- *¿Si los aceros inoxidables son ferromagnéticos?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Reconocer y explicar las designaciones de las diferentes clases de acero.
- Diseñar tratamientos térmicos para producir microestructuras y propiedades específicas en los aceros mediante el uso de diagramas de transformación tiempo-temperatura y de enfriamiento continuo según sea necesario.
- Diferenciar entre las categorías de aceros: aceros al carbono simples, aleaciones de acero, aceros inoxidables, aceros para herramientas, aceros especiales y las subclases en cada categoría.
- Enunciar los elementos de aleación más comunes para el propósito que se empleará el acero.
- Explicar y reconocer las designaciones de los diferentes hierros colados.

Las aleaciones ferrosas, que se basan en aleaciones de hierro y carbono, incluyen aceros al bajo carbono, aleaciones y aceros para herramienta, aceros inoxidables y hierros colados. Estos son los materiales de más amplio uso en el mundo. En la historia de la civilización, estos materiales dejaron su huella pues definieron la *Era del Hierro*. Por lo general, los aceros se producen de dos formas: refinando mineral de hierro o reciclando chatarra de acero.

En la producción de acero primario, el mineral de hierro (procesado para contener de 50 a 70% de óxido de hierro, Fe_2O_3 o Fe_3O_4) se calienta en un alto horno en presencia de coque (una forma de carbono) y oxígeno. El coque reduce el óxido de hierro y lo convierte en un hierro fundido crudo conocido como **metal caliente** o **arrabio**. A unos ~1600°C,

este material contiene alrededor de 95% de hierro; 4% de carbono; 0.3 a 0.9% de silicio; 0.5% de manganeso, y 0.025 a 0.05% de azufre, fósforo y titanio. La escoria es un subproducto derivado del proceso del alto horno. Contiene sílice (dióxido de silicio), CaO y otras impurezas en forma de un silicato fundido. El acero tiene un contenido de carbono hasta un máximo de ~2% en peso. Como el arrabio líquido contiene una gran cantidad de carbono, se le sopla oxígeno en el *horno de oxígeno básico* (HOB) para eliminar el exceso de carbono y producir acero líquido.

Con base en el segundo método, en ocasiones la chatarra se funde en un **horno de arco eléctrico** en el que el calor del arco la funde. Muchos aceros de aleación y especiales, por ejemplo el acero inoxidable, se producen por medio de fundición eléctrica. Es frecuente que los aceros fundidos (entre ellos los aceros inoxidables) sean sometidos a ulteriores refinamientos. El objetivo es reducir los niveles de impurezas como fósforo, azufre, etc., y llevar el carbono a un nivel deseado. El acero fundido se vierte en moldes a fin de producir piezas fundidas de acero acabadas o se vacía en formas que después son procesadas por medio de técnicas para brindar su apariencia final a los metales, por ejemplo, el laminado o el forjado.

Todos los mecanismos de endurecimiento que se estudiaron en el capítulo previo se aplican en por lo menos algunas de las aleaciones ferrosas. En este capítulo se estudiará cómo usar la reacción eutectoide para controlar la estructura y propiedades de aceros mediante tratamiento térmico y aleación. También se examinan dos clases especiales de aleaciones ferrosas: aceros inoxidables y hierros colados.

13-1 Designaciones y clasificación de los aceros

El punto que diferencia los "aceros" de los "hierros fundidos" es 2.11% de C, donde la reacción eutéctica es posible. En el caso de los aceros, el enfoque se concentra en la parte eutectoide del diagrama (figura 13-1) en la que las líneas de solubilidad y la isoterma eutectoide están especialmente identificadas. La A_3 muestra la temperatura a la que la ferrita comienza a formarse cuando se enfría; la A_{cm} indica la temperatura a la que comienza a formarse la cementita, y la A_1 es la temperatura eutectoide.

Casi todos los tratamientos térmicos del acero están orientados a producir la mezcla de ferrita y cementita que da la combinación correcta de propiedades. La figura 13-2 muestra los tres microconstituyentes importantes, o distribuciones de ferrita y cementita que, por lo general, se pretende alcanzar. La perlita es un microconstituyente formado por una mezcla laminar de ferrita y cementita. En la bainita, que se obtiene por transformación de austenita en un subenfriamiento grande, la cementita está más redondeada que en la perlita. La martensita revenida, una mezcla de cementita muy fina y casi redondeada en ferrita, se forma cuando la martensita se recalienta después de su formación.

Designaciones

El AISI (American Iron and Steel Institute) y la SAE (Society of Automotive Engineers) proporcionan sistemas de designaciones (tabla 13-1) que se basan en un número de cuatro o cinco dígitos. Los primeros dos números se refieren a los principales elementos de aleación presentes, y los últimos dos o tres números señalan el porcentaje de carbono. Un acero AISI 1040 es un acero al bajo carbono con 0.40% de C. Un acero SAE 10120 es un acero al bajo carbono que contiene 1.20% de C. Un acero AISI 4340 es un acero de aleación que contiene 0.40% de C. Es necesario mencionar que la American Society for Testing of Materials (ASTM) tiene una forma diferente de clasificar estos materiales pues ha elaborado una lista de especificaciones que describe aceros apropiados para distintas aplicaciones.

Clasificaciones

Los aceros se pueden clasificar con base en su composición o en la forma en que han sido procesados. Los aceros al carbono contienen hasta ~2% de este elemento. Estos aceros pueden también contener otros elementos, por ejemplo Si (máximo 0.6%), Cu (hasta 0.6%) y Mn (hasta 1.65%). Los aceros descarburizados contienen menos de 0.005% de C. Los aceros al carbono

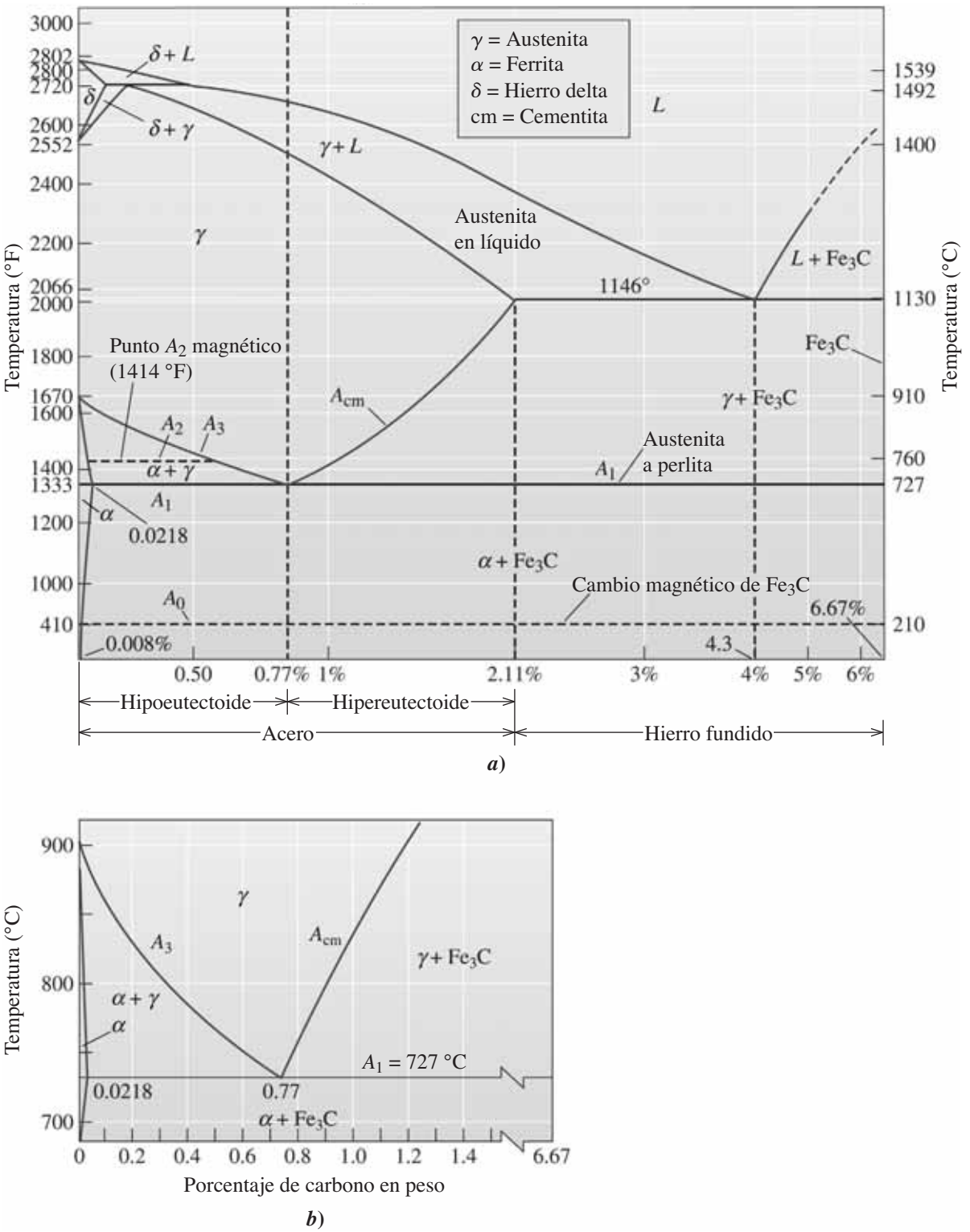


Figura 13-1 *a*) Diagrama de fases de Fe-Fe_3C. *b*) Versión expandida de la parte eutectoide del diagrama Fe-Fe_3C, adaptada de varias fuentes.

ultrabajo contienen un máximo de 0.03% de carbono. También contienen muy bajos niveles de otros elementos, como Si y Mn. Los aceros al bajo carbono contienen 0.04 a 0.15% de carbono. Estos aceros se emplean para fabricar carrocerías de automóviles y cientos de otras aplicaciones.

a) *b*) *c*)

Figura 13-2 Micrografías de *a*) perlita, *b*) bainita y *c*) martensita revenida, que ilustran las diferencias entre tamaños y formas de la cementita de los tres microconstituyentes (7500 ×). (*De* The Making, Shaping and Treating of Steel, *10a. ed. Cortesía de the Association for Iron and Steel Technology*.)

Tabla 13-1 Composiciones de algunos aceros AISI-SAE

Número AISI-SAE	Porc. C	Porc. Mn	Porc. Si	Porc. Ni	Porc. Cr	Otros
1020	0.18–0.23	0.30–0.60				
1040	0.37–0.44	0.60–0.90				
1060	0.55–0.65	0.60–0.90				
1080	0.75–0.88	0.60–0.90				
1095	0.90–1.03	0.30–0.50				
1140	0.37–0.44	0.70–1.00				0.08–0.13% S
4140	0.38–0.43	0.75–1.00	0.15–0.30		0.80–1.10	0.15–0.25% Mo
4340	0.38–0.43	0.60–0.80	0.15–0.30	1.65–2.00	0.70–0.90	0.20–0.300% Mo
4620	0.17–0.22	0.45–0.65	0.15–0.30	1.65–2.00		0.20–0.30% Mo
52100	0.98–1.10	0.25–0.45	0.15–0.30		1.30–1.60	
8620	0.18–0.23	0.70–0.90	0.15–0.30	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25% Y
9260	0.56–0.64	0.75–1.00	1.80–2.20			

Ejemplo 13-1 *Diseño de un método para determinar el número AISI*

Se ha encontrado que una herramienta de acero no aleado, que se emplea para maquinar rines de aluminio para automóviles, funciona correctamente, pero los registros de compras se han perdido y usted no conoce la composición del acero. La microestructura del acero es martensita revenida. Suponga que usted no puede estimar la composición del acero a partir de la estructura. Diseñe un tratamiento que pueda ayudar a determinar el contenido de carbono del acero.

SOLUCIÓN

Suponga que no hay acceso a equipo que nos permitiría analizar directamente la composición química. Como toda la estructura del acero es una martensita revenida muy fina, es posible aplicar un sencillo tratamiento térmico para producir una estructura que pueda analizarse más fácilmente. Este análisis puede realizarse de dos formas diferentes.

La primera es calentar el acero a una temperatura apenas abajo de la temperatura A_1 y mantenerla así durante largo tiempo. El acero se sobrerreviene y se forman esferas grandes de

Fe_3C en una matriz de ferrita. En este momento se puede estimar la cantidad de ferrita y cementita y calcular el contenido de carbono por medio de la ley de la palanca. Si se mide 16% de Fe_3C usando este método, el contenido de carbono es

$$\%\ Fe_3C = \left(\frac{x - 0.0218}{6.67 - 0.0218}\right) \times 100 = 16 \quad \text{o} \quad x = 1.086\%\ C$$

Sin embargo, existe un método mejor: calentar el acero por encima de la A_{cm} para producir sólo la austenita. Si después el acero se enfría lentamente, se transforma en perlita y en un microconstituyente primario. Si, cuando se haga esto, se estima que la estructura contiene 95% de perlita y 5% de Fe_3C primario, entonces

$$\%\ \text{de perlita} = \left(\frac{6.67 - x}{6.67 - 0.77}\right) \times 100 = 95 \quad \text{o} \quad x = 1.065\%\ C$$

El contenido de carbono es de 1.065 a 1.086%, consistente con un acero 10110. Según este procedimiento, se supone que los porcentajes en peso y volumen de los microconstituyentes son iguales, lo cual es un supuesto muy aproximado en el caso de los aceros.

El acero dulce contiene 0.15 a 0.3% de carbono y se usa en edificios, puentes, tuberías, etc. Los aceros al medio carbono contienen 0.3 a 0.6% de carbono y se usan para fabricar maquinaria, tractores, equipo de minería, etc. Los aceros al alto carbono contienen más de 0.6% de carbono y se usan para fabricar resortes, ruedas para carros de ferrocarril y otros objetos semejantes. Observe que los hierros colados son aleaciones de Fe-C que contienen de 2 a 4% de carbono. Los aceros aleados son composiciones que contienen niveles más altos de elementos de aleación. Más adelante en este capítulo se examinará el efecto de los elementos de aleación, los cuales mejoran la capacidad de endurecimiento de los aceros. El AISI define los aceros aleados como aceros que exceden uno o más de los siguientes límites de composición: $\geq$ 1.65% de Mn, 0.6% de Si o 0.6% de Cu. El contenido total de carbono es de hasta 1% y el contenido total del elemento de aleaciones está por debajo de 5%. Un material es también un acero aleado si se especifica una concentración definida de elementos de aleación como Ni, Cr, Mo, Ti, etc. Estos materiales se usan para fabricar herramientas (martillos, cinceles, etc.) y también piezas como ejes, flechas y engranajes.

Ciertos aceros de calidad especial pueden contener niveles más altos de azufre (>0.1%) o plomo (~0.15 a 0.35%) para facilitar su maquinado. Sin embargo, estos aceros no pueden soldarse con facilidad. Recientemente, investigadores han ideado un "acero verde" en el que el plomo, una toxina ambiental, es sustituido con estaño y/o antimonio.

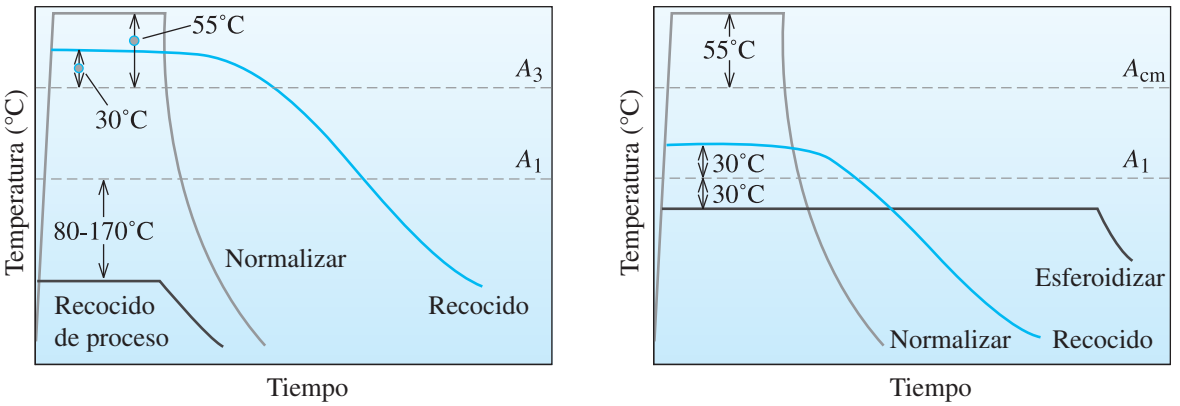
Los aceros también pueden clasificarse con base en su procesamiento. Por ejemplo, el término "aceros obtenidos por colada continua" se refiere a aceros colados continuamente. Los aceros galvanizados tienen un recubrimiento de zinc para resistir la corrosión (capítulo 23). Del mismo modo, el acero con recubrimiento de estaño se usa para fabricar latas y otros productos resistentes a la corrosión. El estaño se deposita por medio de un proceso denominado galvanoplastia, también conocido como "electrodeposición de recuadro continuo". Los "aceros E" se funden usando un horno eléctrico, mientras que los "aceros B" contienen una concentración pequeña pero significativa de boro (0.0005 a 0.003%). Recientemente se ha perfeccionado un acero inoxidable con recubrimiento "resistente a gérmenes".

13-2 Tratamientos térmicos simples

Por lo general, se usan cuatro tratamientos térmicos simples para manejar aceros: recocido de proceso, recocido, normalización y esferoidización (figura 13-3). Estos tratamientos térmicos se emplean para lograr uno de tres propósitos: 1) eliminar los efectos del trabajo en frío, 2) controlar el endurecimiento por dispersión o 3) mejorar la maquinabilidad.

Recocido de proceso: eliminación del trabajo en frío

El tratamiento térmico de recristalización que se emplea para eliminar el efecto del trabajo en frío en aceros con



***a*) Hipoeutectoide** ***b*) Hipereutectoide**

Figura 13-3 Resumen esquemático de los tratamientos térmicos simples de *a*) aceros hipoeutectoides y *b*) aceros hipereutectoides.

menos de alrededor de 0.25% de C recibe el nombre de **recocido de proceso**. Este tratamiento se hace de 80 a 170°C por debajo de la temperatura A_1. El objetivo del tratamiento de recocido de proceso es similar al del recocido de vidrios inorgánicos, en el que la idea principal es reducir de manera importante o eliminar los esfuerzos residuales.

Recocido y normalización: endurecimiento por dispersión

Los aceros pueden ser endurecidos por dispersión si se controla la finura de su perlita. Inicialmente, el acero se calienta para producir austenita homogénea (fase γ CCCa), paso llamado **austenitización**. El **recocido**, o recocido completo, permite que el acero se enfríe lentamente en un horno, lo cual genera una perlita gruesa. La **normalización** permite que el acero se enfríe con más rapidez, al aire, y produzca perlita fina. La figura 13-4 presenta las propiedades comunes que se obtienen cuando se recuecen y normalizan aceros al bajo carbono.

En el caso del recocido, la austenitización de aceros hipoeutectoides se realiza a unos 30°C por encima de la temperatura A_3, lo que da por resultado 100% γ; sin embargo, la austenitización

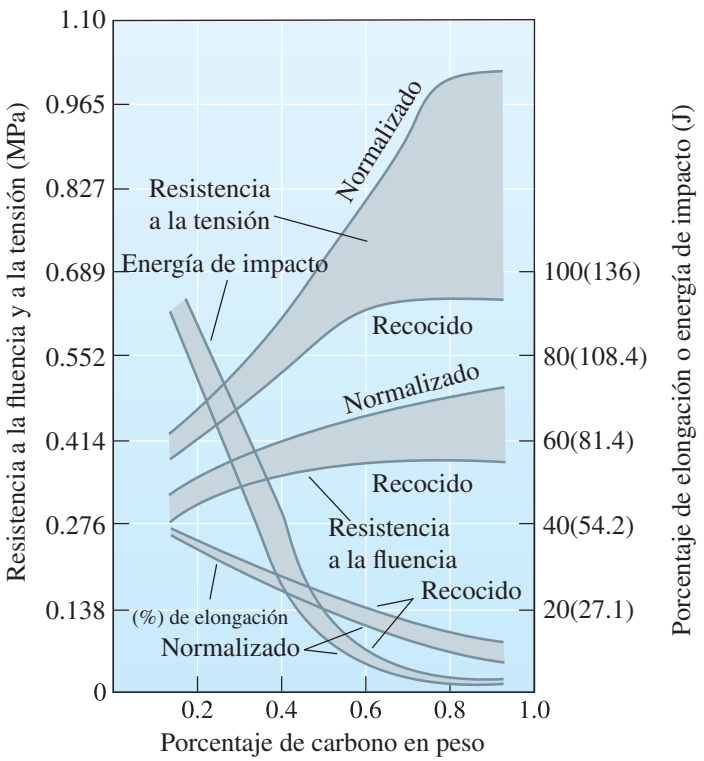


Figura 13-4 Efecto del carbono y del tratamiento térmico en las propiedades de aceros al bajo carbono.

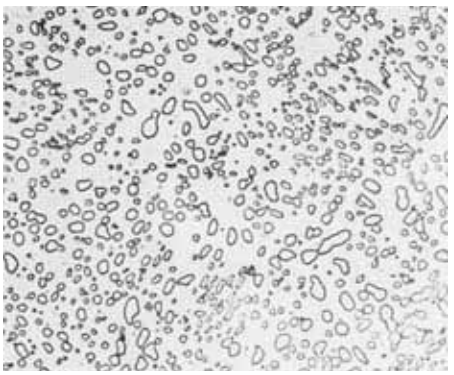


Figura 13-5 Microestructura de esferoidita con partículas de Fe_3C dispersas en una matriz de ferrita (850 ×). [*De* ASM Handbook, *vol.7, (1972), ASM International, Materials Park, OH44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

de un acero hipereutectoide se hace a unos 30°C por encima de la A_1, procedimiento que genera austenita y Fe_3C. Este proceso evita la formación de una película continua y frágil de Fe_3C en los límites de granos que ocurre con enfriamiento lento a partir de la región 100% γ. En ambos casos, el lento enfriamiento en un horno y la perlita gruesa proporcionan una resistencia relativamente baja y buena ductilidad.

En el caso de normalización, la austenitización se realiza a unos 55°C por encima de A_3 o A_{cm}; luego, el acero se remueve del horno y se enfría al aire. El enfriamiento más rápido da perlita fina y produce una mayor resistencia.

Esferoidización: mejora de la maquinabilidad

Los aceros que contienen una gran concentración de Fe_3C muestran características deficintes de maquinabilidad. Es posible transformar la morfología del Fe_3C mediante la *esferoidización*. Durante este tratamiento, que requiere varias horas a unos 30°C por debajo de A_1, cambia la morfología de la fase Fe_3C a partículas esféricas grandes para reducir el área de límite. La microestructura, conocida como **esferoidita**, tiene una matriz continua de ferrita suave, que se puede maquinar (figura 13-5). Después del maquinado, el acero recibe un tratamiento térmico más refinado para obtener las propiedades que se requieren. Una microestructura similar ocurre cuando se reviene martensita un poco por debajo de A_1 durante largos periodos. Como ya se dijo, también se agregan ciertos elementos de aleación, como el Pb y S, para mejorar las características de maquinado de aceros y se han inventado "aceros verdes" sin plomo que tienen muy buenas características de maquinado.

El siguiente ejemplo muestra cómo pueden desarrollarse condiciones diferentes de tratamiento térmico para una composición determinada de acero.

Ejemplo 13-2 *Determinación de temperaturas para tratamiento térmico*

Temperaturas recomendadas para el recocido de proceso, recocido, normalización y esferoidización de aceros 1020, 1077 y 10120.

SOLUCIÓN

En la figura 13-1 se determinan las temperaturas críticas A_1, A_3 o A_{cm} para cada uno de los aceros. En consecuencia, es posible especificar el tratamiento térmico basado en estas temperaturas.

Tipo de acero	1020	1077	10120
Temperaturas críticas	A_1 = 727°C A_3 = 830°C	A_1 = 727°C	A_1 = 727°C A_{cm} = 895°C
Recocido de proceso	727 − (80 a 170) = 557°C a 647°C	No se realiza	No se realiza
Recocido	830 + 30 = 860°C	727 + 30 = 757°C	727 + 30 = 757°C
Normalización	830 + 55 = 885°C	727 + 55 = 782°C	895 + 55 = 950°C
Esferoidización	No se realiza	727 − 30 = 697°C	727 − 30 = 697°C

13-3 Tratamientos térmicos isotérmicos

El efecto de la temperatura de transformación en las propiedades de un acero 1080 (eutectoide) se estudió en el capítulo 12. Cuando disminuye la temperatura de transformación isotérmica, la perlita se hace cada vez más fina antes que la bainita comience a formarse. A temperaturas muy bajas, se obtiene martensita.

Bainitizado o austemplado y recocido isotérmico

El tratamiento térmico de transformación isotérmica que se emplea para producir bainita, llamado **bainitizado** o **austemplado**, simplemente involucra austenitizar el acero, templándolo a alguna temperatura por debajo de la nariz de la curva TTT, y mantener esa temperatura hasta que toda la austenita se transforme en bainita (figura 13-6).

Por lo general, el recocido y la normalización se usan para controlar la finura de la perlita; no obstante, la perlita formada por un **recocido isotérmico** (figura 13-6) puede contener propiedades más uniformes, porque las magnitudes de velocidad de enfriamiento y microestructura que se obtienen durante el recocido y normalización varían en toda la sección transversal del acero. *Observe que los diagramas TTT sólo describen tratamientos térmicos (es decir, se supone que la muestra comienza y completa el tratamiento térmico a una temperatura determinada)*. Así, no es posible describir exactamente tratamientos térmicos si se superponen curvas de enfriamiento en un diagrama TTT como las que se ven en la figura 13-6.

Efecto de los cambios en la concentración de carbono en el diagrama TTT

Ya sea que se refiera a un acero hipoeutectoide o a uno hipereutectoide, el diagrama TTT debe reflejar la posible formación de una fase primaria. Los diagramas de transformación isotérmica de un acero 1050 y uno 10110 se ilustran en la figura 13-7. El cambio más notable es la presencia de un "ala" que comienza en la nariz de la curva y se hace asintótica a la temperatura A_3 o A_{cm}. Esta ala representa el tiempo de inicio de ferrita (F_s) en aceros hipoeutectoides o el tiempo de inicio de la cementita (C_s) en aceros hipereutectoides.

Cuando un acero 1050 se austenitiza, se templa y se mantiene entre A_3 y A_1, la ferrita primaria forma núcleos y crece. Al final, las cantidades resultantes de ferrita y austenita se equilibran. Del mismo modo, la ferrita primaria forma núcleos y crece hasta alcanzar su cantidad de equilibrio en un acero 10110 entre las temperaturas A_{cm} y A_1.

Si un acero 1050 austenitizado se enfría a una temperatura comprendida entre las temperaturas de la nariz y la correspondiente a A_1, de nuevo la ferrita primaria forma un núcleo y crece

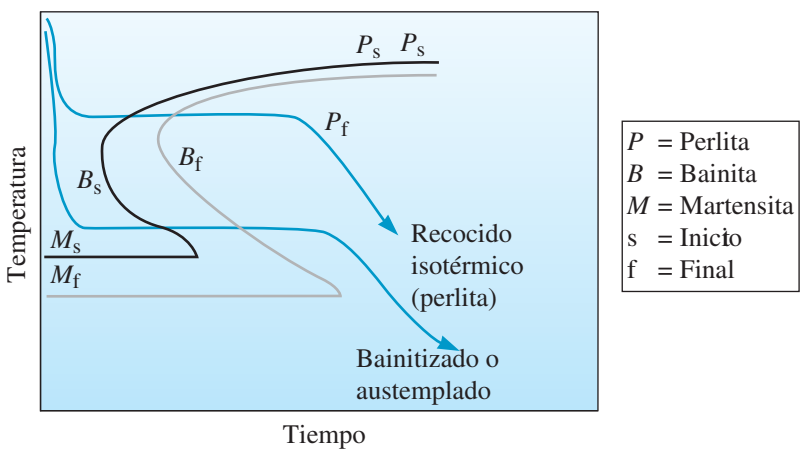


Figura 13-6 Tratamientos térmicos de bainitizado o austemplado y recocido isotérmico en un acero 1080.

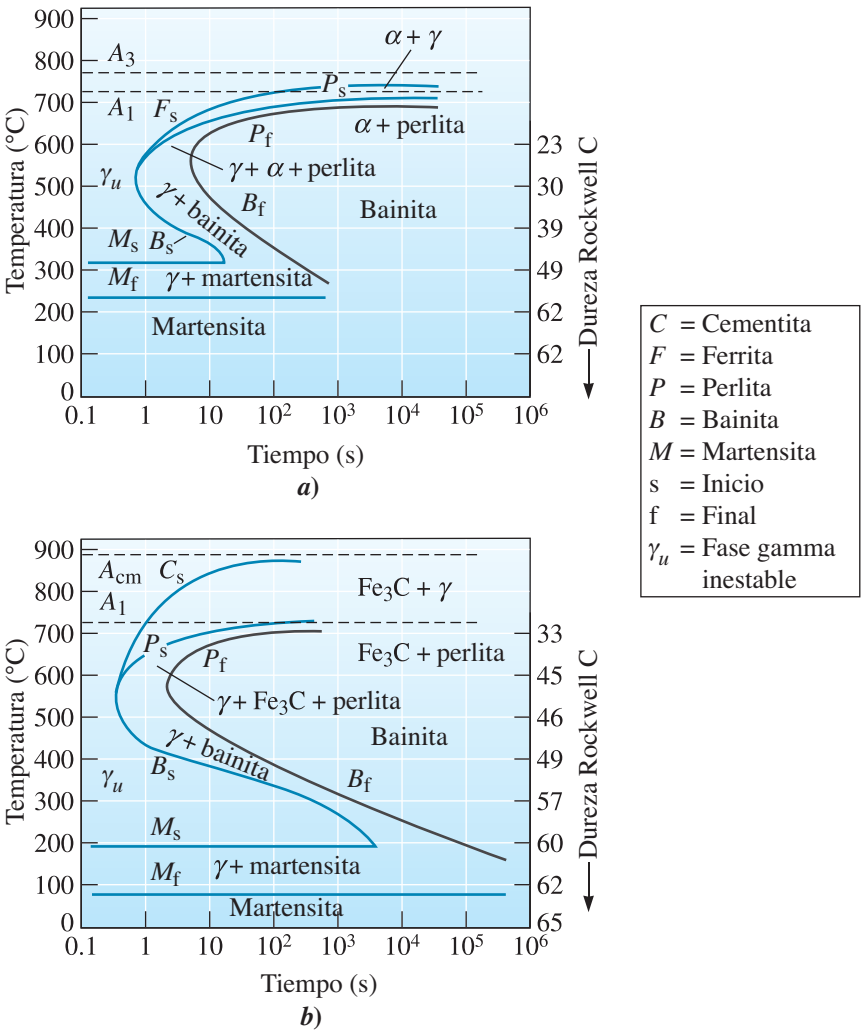


Figura 13-7 Diagramas TTT de *a*) un acero 1050 y *b*) un acero 10110.

hasta alcanzar la cantidad de equilibrio. A continuación, el resto de la austenita se transforma en perlita. Una situación similar, la producción de cementita y perlita, se presenta en el caso del acero hipereutectoide.

Si se templa el acero por debajo de la nariz de la curva, sólo se forma bainita, sin que importe cuál sea el contenido de carbono del acero. Si los aceros se templan a temperaturas debajo de la M_s, se formará martensita. El ejemplo 13-3 muestra la forma en que el diagrama de fases y el diagrama TTT pueden guiar el desarrollo del tratamiento térmico de aceros.

Interrupción de la transformación isotérmica

Cuando se interrumpe un tratamiento térmico isotérmico se producen complejas microestructuras. Por ejemplo, se podría austenitizar el acero 1050 (figura 13-8) a 800°C, templar a 650°C y mantenerlo así durante 10 s (lo cual permite que se formen algo de ferrita y de perlita), luego templar a 350°C y mantenerlo así durante una hora (3,600 s). Cualquier cantidad de austenita inestable restante antes de templar a 350°C se transforma en bainita. La estructura final es ferrita, perlita y bainita. El tratamiento se complicaría aún más si el tratamiento se interrumpe a 350°C después de 1 min (60 s) y se templa. Cualquier austenita restante después de 1 min a 350°C forma martensita. La estructura final ahora contiene ferrita, perlita, bainita y martensita. ¡Observe que cada vez que se cambia la temperatura, se comienza a contar el tiempo desde cero! En la práctica, las temperaturas no se pueden cambiar de forma

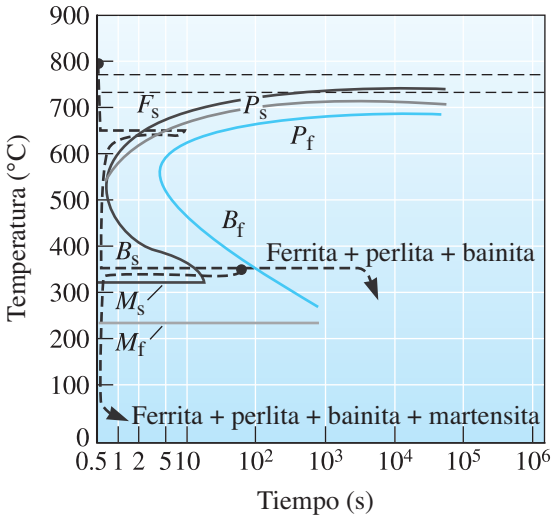


Figura 13-8 Producción de estructuras complejas cuando se interrumpe el tratamiento térmico isotérmico de un acero 1050.

instantánea (es decir, no es posible pasar de inmediato de 80 a 650 o de 650 a 350°C). Esta es la razón por la cual es mejor usar los diagramas de transformación de enfriamiento continuo (TEC).

Ejemplo 13-3 *Diseño de un tratamiento térmico para un eje*

Para producir una microestructura uniforme y una dureza de DRC 23 en un eje de acero 1050 se requiere un tratamiento térmico.

SOLUCIÓN

Se podría afrontar esta tarea de varias formas. Por ejemplo, austenitizar el acero, luego enfriarlo a una rapidez apropiada por recocido o normalizado para obtener la dureza correcta. No obstante, si se aplica este procedimiento, se encuentra que la estructura y la dureza varían de la superficie al centro del eje.

Un método mejor es usar un tratamiento térmico isotérmico. En la figura 13-7 se encuentra que se obtiene una dureza de DRC 23 cuando la austenita se transforma en una mezcla de ferrita y perlita a 600°C. En la figura 13-1 se encuentra que la temperatura A_3 es de 770°C. Por lo tanto, el tratamiento térmico debe ser:

1. Austenitizar el acero a 770 + (30 a 55) = 800 a 825°C, y mantenerlo así durante una hora, con lo cual se obtiene 100% γ.
2. Templar el acero a 600°C y mantenerlo así durante un mínimo de 10 s. La ferrita primaria comienza a precipitarse a partir de la austenita inestable después de alrededor de 1.0 s. Luego de 1.5 s, comienza a crecer perlita y la austenita se transforma por completo en ferrita y perlita después de unos 10 s. Después de este tratamiento, los microconstituyentes presentes son

$$\alpha \text{ primaria} = \left(\frac{0.77 - 0.50}{0.77 - 0.0218}\right) \times 100 = 36\%$$

$$\text{Perlita} = \left(\frac{0.50 - 0.0218}{0.77 - 0.0218}\right) \times 100 = 64\%$$

3. Enfriar al aire a temperatura ambiente, pero preservar las cantidades de ferrita primaria y perlita. La microestructura y la dureza son uniformes debido al recocido isotérmico.

13-4 Tratamientos térmicos de templado y revenido

El templado endurece casi todos los aceros y el revenido incrementa la tenacidad, resultados que se conocen quizá desde hace miles de años. Por ejemplo, una serie de esos tratamientos térmicos se ha utilizado para fabricar acero de Damasco y espadas japonesas de samurái. Es posible obtener una dispersión excepcionalmente fina de Fe_3C y ferrita (conocida como martensita revenida) si primero se templa la austenita para producir martensita y luego se reviene. El tratamiento por revenido controla las propiedades finales del acero (figura 13-9). Observe que este proceso es diferente de un tratamiento térmico por esferoidización (figura 13-5). El siguiente ejemplo muestra la forma en que una combinación de tratamientos térmicos se emplea para obtener aceros con las propiedades deseadas.

Austenita retenida

Se produce una gran expansión de volumen cuando se forma martensita a partir de austenita. A medida que se forman placas de martensita durante el templado, las placas rodean y aíslan pequeños depósitos de austenita (figura 13-10), que se deforman para dar espacio a la martensita de menor densidad. No obstante, cuando avanza la transformación, para que se transformen los restantes depósitos de austenita, la martensita circundante debe deformarse. Debido a que la martensita fuerte se resiste a la transformación, la martensita existente se agrieta o permanece atrapada en la estructura como **austenita retenida,** lo cual puede ser un problema serio. La martensita se ablanda y se hace más dúctil durante el revenido. Después del revenido, la austenita retenida se enfría por debajo de las temperaturas M_s y M_f y se transforma en martensita, dado que la **martensita revenida** se puede deformar. ¡Pero ahora el acero tiene un contenido mayor de martensita dura y quebradiza! Es posible que sea necesario un segundo paso de revenido para eliminar la

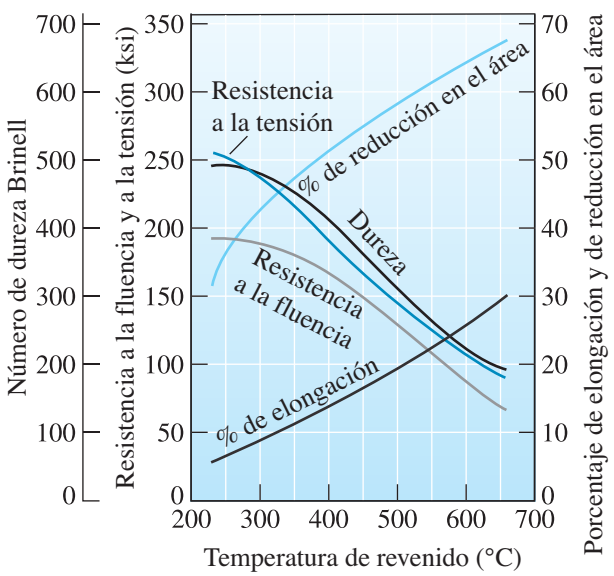


Figura 13-9 Efecto de la temperatura de revenido en las propiedades mecánicas de un acero 1050.

Figura 13-10 Austenita retenida (blanca) atrapada entre agujas de martensita (negra) (1000 ×). [*De* ASM Handbook, *vol.8, (1973), ASM International, Materials Park, OH44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

Ejemplo 13-4 *Diseño de un tratamiento de templado y revenido*

Una flecha giratoria que transmite la energía de un motor eléctrico está hecha de acero 1050. Su resistencia a la fluencia debe ser por lo menos de 1000 MPa, y debe tener por lo menos 15% de elongación para obtener tenacidad. Diseñe un tratamiento térmico para producir esta pieza.

SOLUCIÓN

No es posible obtener esta combinación de propiedades por recocido o normalización (figura 13-4), pero un tratamiento térmico de templado y revenido produce una microestructura que puede tener tanto resistencia como tenacidad. La figura 13-9 muestra que la resistencia a la fluencia pasa de 1000 MPa si el acero se reviene por debajo de 460°C, mientras que la elongación es mayor de 15% si el revenido se hace arriba de 425°C. La temperatura A_3 del acero es de 770°C. Un posible tratamiento térmico es

1. Austenitizar arriba de la temperatura A_3 de 770°C durante una hora. Una temperatura apropiada puede ser 770 + 55 = 825°C.
2. Templar rápidamente a temperatura ambiente. Como la M_f es de unos 250°C, se formará martensita.
3. Revenir por calentamiento el acero a 440°C. Normalmente, una hora será suficiente si el acero no es demasiado grueso.
4. Enfriar a temperatura ambiente.

martensita formada de la austenita retenida, que genera más de un problema para los aceros al alto carbono. Las temperaturas de inicio y terminación de la martensita se reducen cuando aumenta el contenido de carbono (figura 13-11). Los aceros al alto carbono deben ser refrigerados para producir sólo la martensita.

Esfuerzos residuales y agrietamiento

Los esfuerzos residuales también se producen por el cambio de volumen o por el trabajo en frío. Puede usarse un recocido de alivio de esfuerzos internos con la finalidad de remover o reducir al mínimo los esfuerzos residuales generados por el trabajo en frío. Los esfuerzos también son inducidos por la expansión y contracción térmicas. En el caso de los aceros se conoce otro mecanismo que provoca esfuerzos. Cuando los aceros

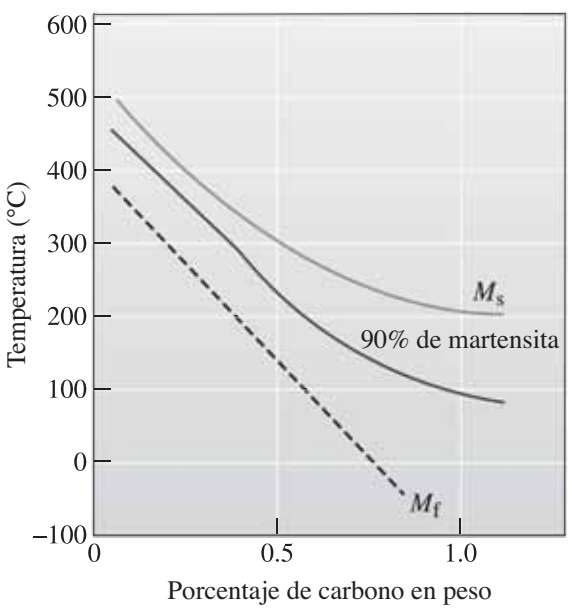


Figura 13-11 Cuando se incrementa el carbono se reducen las temperaturas M_s y M_f en aceros al bajo carbono.

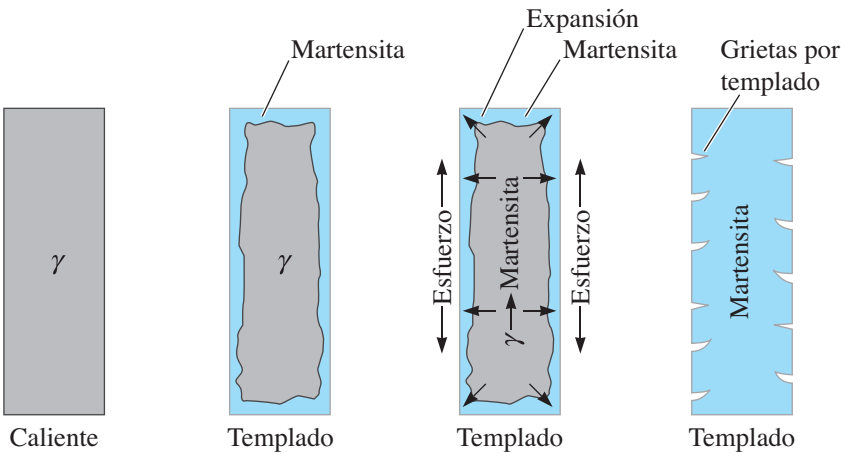


Figura 13-12 Formación de grietas por templado provocadas por el desarrollo de esfuerzos residuales el desarrollo de que se producen durante el templado. La figura ilustra esfuerzos cuando la austenita se transforma en martensita durante el enfriamiento.

se templan, la superficie del acero templado se enfría rápidamente y se transforma en martensita. Cuando la austenita del centro se transforma después, la superficie dura se somete a tensión en tanto que el centro se comprime. Si los esfuerzos residuales rebasan la resistencia a la fluencia, se forman **grietas por templado** en la superficie (figura 13-12). Para evitar este defecto, primero se puede enfriar a apenas arriba de M_s y mantener así hasta que la temperatura del acero se iguale; un templado subsiguiente permite que todo el acero se transforme en martensita más o menos al mismo tiempo. Este tratamiento térmico se denomina **templado arriba de M_s** o **temple martensítico ininterrumpido** (figura 13-13). Observe que, como se explica por ahora, estrictamente, los diagramas TEC deben usarse para examinar tratamientos térmicos no isotérmicos.

Rapidez de templado

Se suponía que al usar el diagrama TTT se podría enfriar instantáneamente de la temperatura de austenitización a la de transformación. Debido a que este proceso no ocurre en la práctica, pueden formarse microconstituyentes no deseables durante el proceso de templado. Por ejemplo, puede formarse perlita cuando el acero se enfría y rebasa la nariz de la curva, en particular porque el tiempo de la nariz es menor de un segundo en aceros al carbono simples.

La rapidez a la que el acero se enfría durante el templado depende de varios factores. Primero, la superficie siempre se enfría más rápido que el centro de la pieza. Además, cuando ésta aumenta

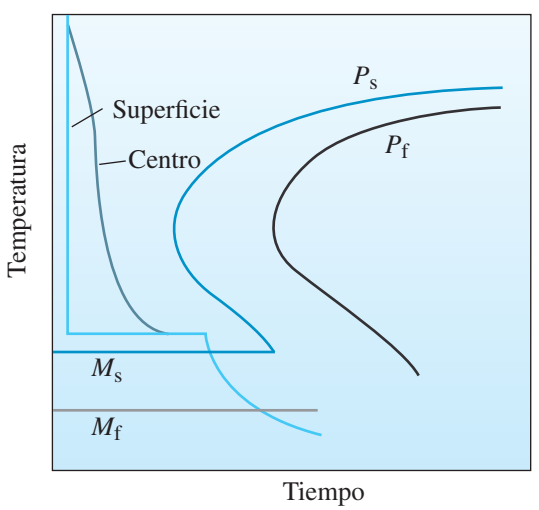


Figura 13-13 Tratamiento térmico de templado arriba de M_s, diseñado para reducir esfuerzos residuales y grietas por templado.

Tabla 13-2 Coeficiente H, o severidad del templado, para varios medios de templado

Medio	Coeficiente H	Velocidad de enfriamiento en el centro de una barra de una pulgada (°C/s)
Aceite (sin agitación)	0.25	18
Aceite (con agitación)	1.0	45
H_2O (sin agitación)	1.0	45
H_2O (con agitación)	4.0	190
Salmuera (sin agitación)	2.0	90
Salmuera (con agitación)	5.0	230

de tamaño, la velocidad de enfriamiento en cualquiera de sus partes es más lenta. Por último,dicha velocidad depende de la temperatura y las características de transferencia de calor del medio de templado (tabla 13-2). El templado en aceite, por ejemplo, produce un coeficiente H más bajo, o menor velocidad de enfriamiento, que el templado en agua o en salmuera. El coeficiente H es equivalente al coeficiente de transferencia térmica. La agitación ayuda a romper la capa de vapor (por ejemplo, cuando el agua es el medio de templado) y mejora la rapidez total de transferencia térmica, pues lleva líquido más fresco para hacer contacto con las piezas que se templan.

Diagramas de transformación de enfriamiento continuo

Se puede desarrollar un diagrama de *transformación de enfriamiento continuo* (TEC) si se determinan las microestructuras que se producen en el acero a varias magnitudes de velocidad de enfriamiento. En la figura 13-14 se ilustra la curva TEC de un acero 1080.

Si se enfría un acero 1080 a 5°C/s, el diagrama TEC dice que se obtiene perlita gruesa; el acero se ha recocido. Enfriar a 35°C/ s da la perlita fina y es un tratamiento térmico de normalización. Enfriar a 100°C/s permite que se inicie la formación de perlita, pero la reacción es incompleta y la austenita restante cambia a martensita. Se obtiene 100% de martensita y por lo tanto se puede realizar un tratamiento térmico de templado y revenido, sólo si se enfría más rápido que 140°C/ s. Otros aceros, por ejemplo el acero al bajo carbono de la figura 13-15, tienen diagramas TEC más complejos. En varios manuales se puede hallar una compilación de diagramas TTT y TEC de diferentes grados de aceros.

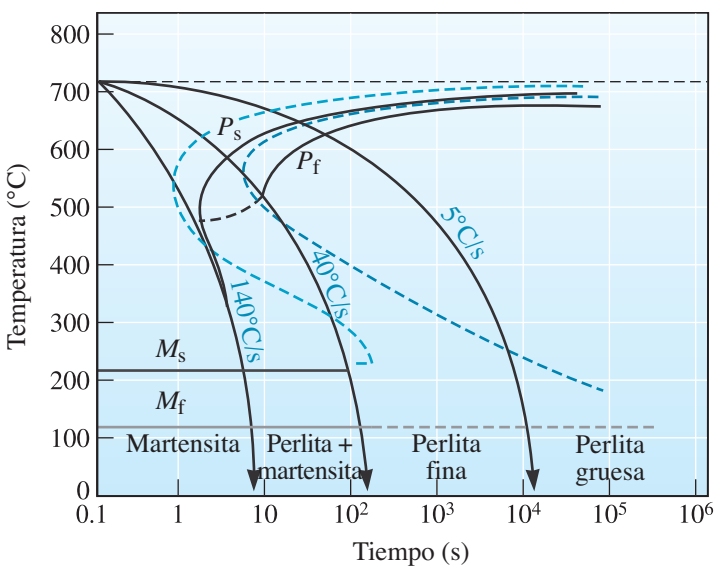


Figura 13-14 Diagrama TEC (líneas continuas) de un acero 1080 comparado con el diagrama TTT (líneas discontinuas).

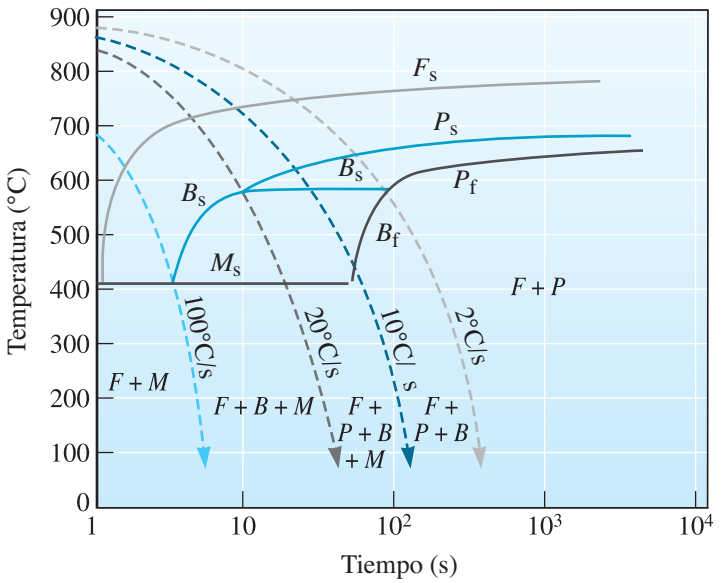


Figura 13-15 Diagrama TEC de un acero de baja aleación, 0.2% de C.

13-5 Efecto de los elementos de aleación

Se agregan elementos de aleación a aceros para *a*) obtener endurecimiento por solución sólida de la ferrita, *b*) provocar la precipitación de carburos de aleación en vez de Fe_3C, *c*) mejorar la resistencia a la corrosión y otras características especiales del acero y *d*) mejorar la **templabilidad**. Este último término describe la facilidad con la que los aceros pueden formar martensita, lo cual se relaciona con la facilidad con que se puede formar martensita en una sección gruesa de acero que se templa. Si se cuenta con un acero que se puede endurecer con más facilidad, es posible "salir" con una velocidad de enfriamiento relativamente lenta y aun así formar martensita. Mejorar la templabilidad es muy importante en aceros aleados y aceros para herramienta.

Templabilidad

En aceros al bajo carbono, la nariz de las curvas TTT y TEC se presenta en tiempos muy cortos; en consecuencia, se requiere de magnitudes de velocidad de enfriamiento muy rápidas para producir sólo martensita. En secciones delgadas de acero, el templado rápido produce distorsión y grietas; en aceros gruesos, no se puede obtener martensita. Todos los elementos comunes de aleación en acero desplazan los diagramas TTT y TEC a tiempos más largos, lo cual permite obtener sólo martensita incluso en secciones gruesas a magnitudes de velocidad de enfriamiento lentas. En la figura 13-16 se muestran las curvas TTT y TEC de un acero 4340.

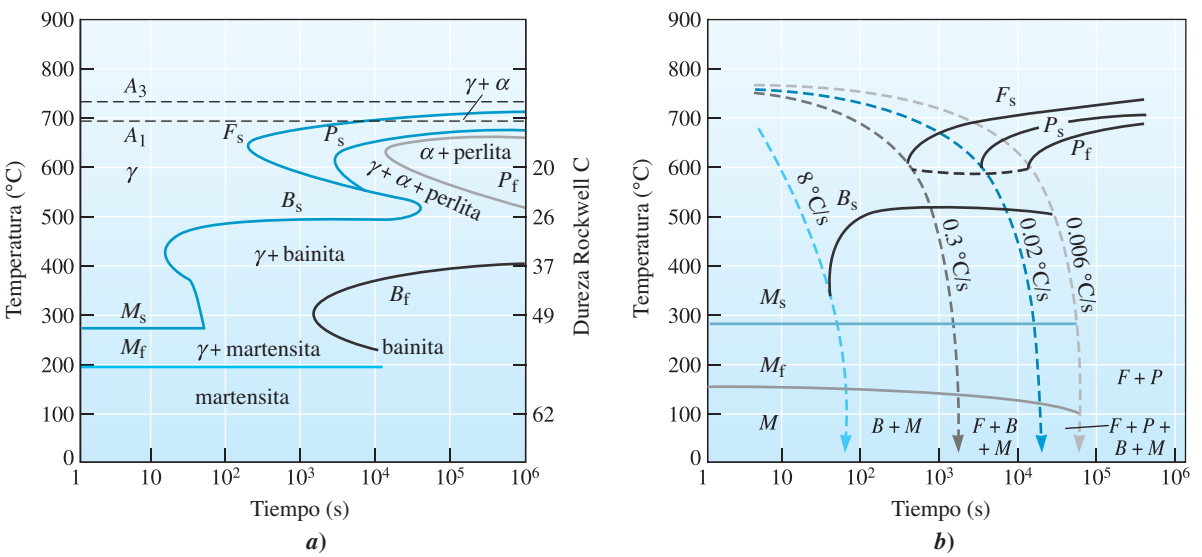


Figura 13-16 Curvas *a*) TTT y *b*) TEC de un acero 4340.

Los aceros al bajo carbono tienen escasa templabilidad; únicamente magnitudes de velocidad de enfriamiento muy rápido producen sólo martensita. Los aceros de aleación tienen alta templabilidad, incluso enfriando al aire pueden producir martensita. La templabilidad no se refiere a la dureza del acero. Un acero al bajo carbono y de alta aleación puede fácilmente formar martensita pero, debido al bajo contenido de carbono, la martensita no es dura.

Efecto de la estabilidad de fases

Cuando se agregan elementos de aleación al acero, se altera la estabilidad del Fe-Fe_3C binario, así como el diagrama de fases (figura 13-17). Los elementos de aleación reducen el contenido de carbono al cual ocurre la reacción eutectoide y cambian las temperaturas A_1, A_3 y A_{cm}. Un acero que contiene sólo 0.6% de C es hipoeutectoide y operaría a 700°C pero no formaría austenita; el acero que de otra forma sería igual y que contiene 6% de Mn es hipereutectoide y se forma austenita a 700°C.

Forma del diagrama TTT

Los elementos de aleación pueden introducir una región de "bahía" en el diagrama TTT, como en el caso del acero 4340 (figura 13-16). La región de bahía se usa como base para un tratamiento térmico termomecánico conocido como **deformación de la austenita metaestable hacia 500°C (ausformado)**. Un acero puede ser austenitizado, templado hasta la región de bahía, plásticamente deformado y, por último, templado para producir martensita (figura 13-18). Los aceros sujetos a este tratamiento se conocen como *aceros ausformados*.

Revenido

Los elementos de aleación reducen la rapidez de revenido en comparación con la de un acero al bajo carbono simple (figura 13-19). Este efecto puede permitir que los aceros de aleación operen en forma más satisfactoria a temperaturas más altas que los aceros al bajo carbono simples, porque el exceso de envejecimiento no ocurre durante el servicio.

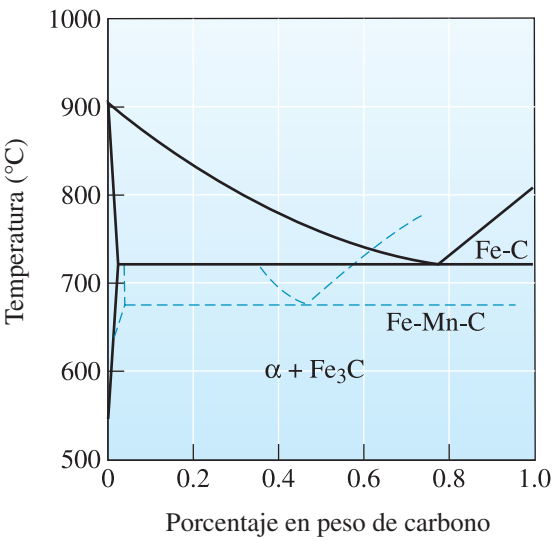


Figura 13-17 Efecto de 6% de manganeso en los intervalos de estabilidad de las fases en la parte eutectoide del diagrama de fases de Fe-Fe_3C.

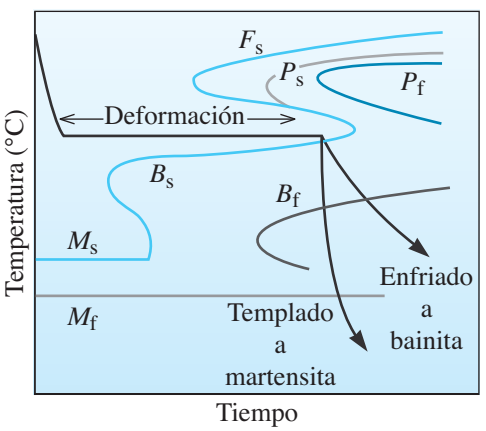


Figura 13-18 Cuando los elementos de aleación introducen una bahía en el diagrama TTT, el acero puede ser ausformado.

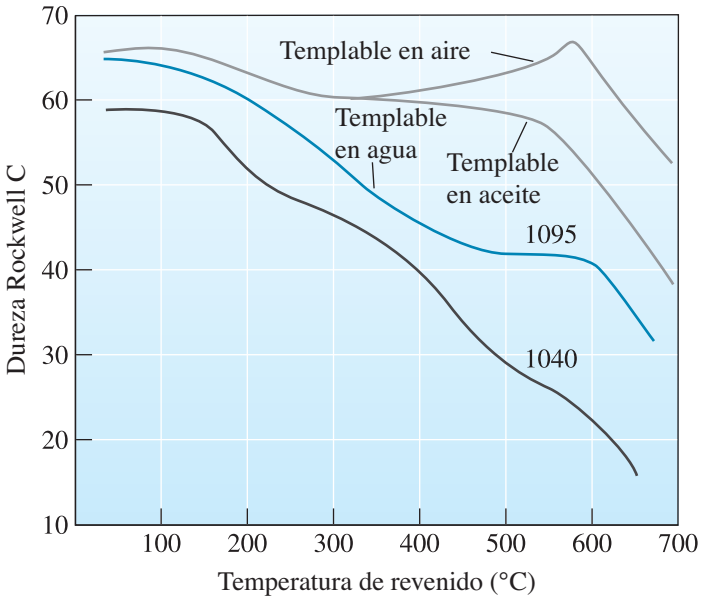


Figura 13-19 Efecto de los elementos de aleación en las fases formadas durante el revenido de aceros. El acero que se puede templar al aire muestra un pico secundario de endurecimiento.

13-6 Aplicación de la templabilidad

Se utiliza la **prueba de Jominy** (figura 13-20) para comparar la templabilidad de aceros. Una barra de acero de 4 pulg de largo y 1 pulg de diámetro es austenitizada, colocada en un aparato y rociada con agua en un extremo. Este procedimiento produce una amplia variedad de magnitudes de velocidad de enfriamiento: muy rápida en el extremo templado y casi con enfriamiento al aire en el extremo opuesto. Después de la prueba, se realizan mediciones de dureza a lo largo del espécimen de prueba y se grafican para obtener la **curva de templabilidad** (figura 13-21). La distancia desde el extremo templado es la **distancia Jominy,** que se relaciona con la velocidad de enfriamiento (tabla 13-3).

Prácticamente cualquier acero se transforma en martensita en el extremo templado. En consecuencia, la dureza a la distancia Jominy de cero está determinada sólo por el contenido de carbono del acero. A mayores distancias de Jominy, hay una más alta probabilidad de que se formen bainita o perlita en lugar de martensita. Un acero de aleación con alta templabilidad (por ejemplo, el 4340) mantiene una curva de templabilidad más bien plana; un acero al bajo carbono (por ejemplo, el 1050) tiene una curva que baja a gran velocidad. La templabilidad está determinada principalmente por el contenido de aleación del acero.

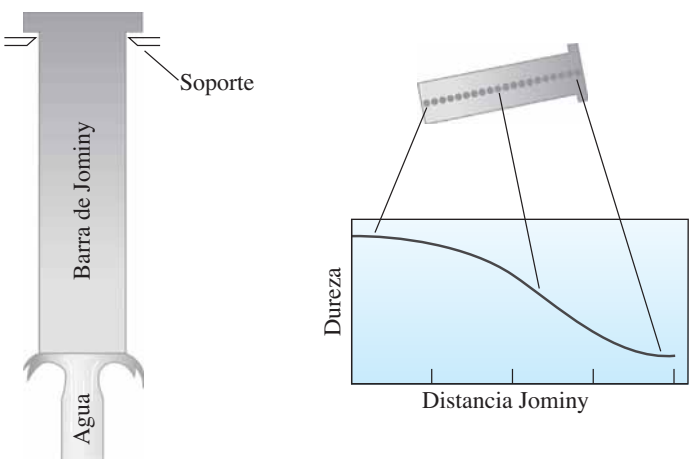


Figura 13-20 Montaje para la prueba de Jominy que se emplea para determinar la templabilidad de un acero.

Se pueden usar curvas de templabilidad para seleccionar o sustituir aceros en aplicaciones prácticas. El hecho de que dos aceros diferentes se enfríen a la misma rapidez, si se templan bajo condiciones idénticas, ayuda en este proceso de selección, como se muestra en el ejemplo siguiente.

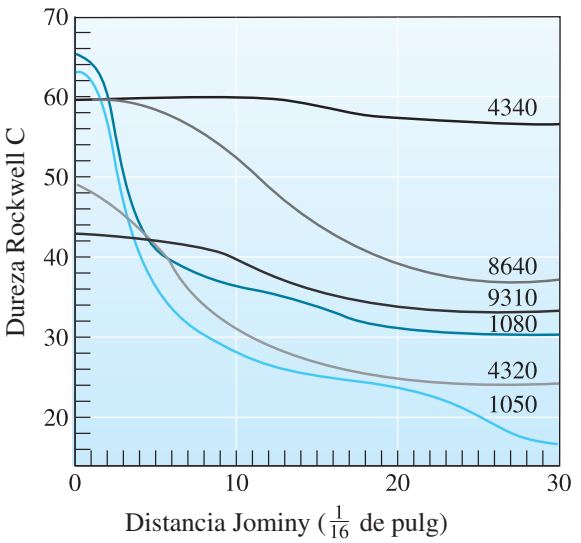


Figura 13-21 Curvas de templabilidad de varios aceros.

Tabla 13-3 Relación entre la velocidad de enfriamiento y la distancia Jominy

Distancia Jominy		Velocidad de enfriamiento (°C/s)
mm	pulg	
1.59	$\frac{1}{16}$	315
3.18	$\frac{2}{16}$	110
4.76	$\frac{3}{16}$	50
6.35	$\frac{4}{16}$	36
7.938	$\frac{5}{16}$	28
9.525	$\frac{6}{16}$	22
11.113	$\frac{7}{16}$	17
12.7	$\frac{8}{16}$	15
15.88	$\frac{10}{16}$	10
19.05	$\frac{12}{16}$	8
25.4	$\frac{16}{16}$	5
31.75	$\frac{20}{16}$	3
38.1	$\frac{24}{16}$	2.8
44.45	$\frac{28}{16}$	2.5
57.15	$\frac{36}{16}$	2.2

Ejemplo 13-5 *Diseño de un engrane resistente al desgaste*

Un engrane de acero 9310, que tiene una dureza según se templó en un punto crítico de DRC 40, se desgasta con una rapidez excesiva. Diversas pruebas han demostrado que se requiere una dureza después del templado de por lo menos DRC 50 en ese punto crítico. Diseñe un acero apropiado.

SOLUCIÓN

Se sabe que si diferentes aceros de las mismas dimensiones se templan bajo condiciones idénticas, sus magnitudes de velocidad de enfriamiento o distancias Jominy son las mismas. En el caso de la figura 13-21, una dureza de DRC 40 en un acero 9310 corresponde a una distancia Jominy de 10/16 de pulg (10°C/s). Si se supone la misma distancia Jominy, los otros aceros que se ilustran en la figura 13-21 tienen las siguientes durezas en el punto crítico:

1050 DRC 28

4320 DRC 31

1080 DRC 36

8640 DRC 52

4340 DRC 60

Tanto el acero 8640 como el 4340 son apropiados. Este último tiene un contenido demasiado bajo de carbono para alcanzar la dureza DRC 50; los 1050 y 1080 tienen suficiente carbono, pero la templabilidad es demasiado baja. En la tabla 13-1 se encuentra que los aceros 86xx contienen menos elementos de aleación que los aceros 43xx; entonces, el acero 8640 es quizá menos caro que el acero 4340 y podría ser la mejor opción.

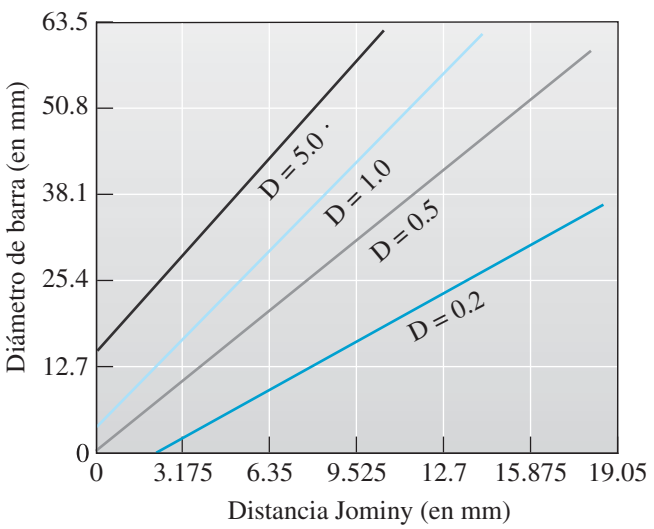


Figura 13-22 Gráfica de Grossman que se emplea con el fin de determinar la templabilidad en el centro de una barra de acero con diferentes medios de temple.

Otra técnica sencilla utiliza la severidad del templado y la gráfica de Grossman (figura 13-22) para determinar la dureza en el *centro* de una barra redonda. El diámetro de la barra y el coeficiente H, o severidad del templado en la tabla 13-2, indican la distancia Jominy en el centro de la barra. En consecuencia es posible determinar la dureza a partir de la curva de templabilidad del acero. (Vea el ejemplo 13-6.)

Ejemplo 13-6 *Diseño de un proceso de templado*

Diseñe un proceso de templado para producir una dureza mínima de DRC 40 en el centro de una barra de acero 4320 de 38.1 mm de diámetro.

SOLUCIÓN

En la tabla 13-2 aparecen varios medios de temple. Es posible hallar un coeficiente H aproximado de cada uno de los medios de temple, y a continuación usar la figura 13-22 para estimar la distancia Jominy en una barra de 1.5 pulg de diámetro de cada medio. Por último, se puede usar la curva de templabilidad (figura 13-21) para determinar la dureza del acero 4320. Los resultados aparecen a continuación.

	Coeficiente H	Distancia Jominy	DRC
Aceite (sin agitación)	0.25	12/16	28
Aceite (con agitación)	1.0	6/16	39
H_2O (sin agitación)	1.0	6/16	39
H_2O (con agitación)	4.0	4/16	44
Salmuera (sin agitación)	2.0	5/16	42
Salmuera (con agitación)	5.0	3/16	46

Los últimos tres métodos, basados en salmuera o agua agitada, son satisfactorios. Usando un medio de rápido enfriamiento de salmuera sin agitación podría ser el menos caro, dado que no se necesita equipo extra para agitar el baño de temple; no obstante, el H_2O es menos corrosivo que el medio para rápido enfriamiento de salmuera.

13-7 Aceros especiales

Hay numerosas categorías especiales de aceros, entre ellos aceros para herramienta, aceros sin intersticios, aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), aceros de fase dual y aceros martensíticos envejecibles.

Por lo general, los **aceros para herramienta** son al alto carbono, que obtienen mucha dureza por medio de un tratamiento térmico de templado y revenido. Sus aplicaciones incluyen herramientas de corte en operaciones de maquinado, matrices para el colado en matriz, dados de conformación y otros usos en los que es necesaria una combinación de alta resistencia, dureza, tenacidad y resistencia a la temperatura.

Los elementos de aleación mejoran la templabilidad y la estabilidad a altas temperaturas de los aceros para herramienta. Aquellos que se pueden templar en agua, por ejemplo el 1095, deben ser templados con rapidez para producir martensita y también suavizarse con gran rapidez, incluso a temperaturas relativamente bajas. Los aceros que se pueden templar en aceite forman martensita con más facilidad, se templan con más lentitud, pero todavía se suavizan a altas temperaturas. Los aceros para herramienta que se pueden templar al aire, y los especiales, pueden endurecerse hasta llegar a martensita mientras se enfrían al aire. Además, estos aceros pueden no suavizarse sino hasta que están cerca de la temperatura A_1. De hecho, los aceros para herramienta de alta aleación pueden pasar por un **pico de endurecimiento secundario** cerca de 500°C cuando la cementita normal se disuelve y los carburos de aleación duros se precipitan (figura 13-19). Los carburos de aleación son particularmente estables, resisten el crecimiento o esferoidización y son importantes para establecer la resistencia a alta temperatura de estos aceros.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) son aceros al bajo carbono que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación. Estos aceros están especificados con base en la resistencia a la fluencia con grados hasta de 552 MPa; los aceros contienen la mínima cantidad de elemento de aleación que todavía proporciona la resistencia a la fluencia apropiada sin tratamiento térmico. En estos aceros, un cuidadoso procesamiento permite la precipitación de carburos y nitruros de Nb, V, Ti o Zr, que otorgan endurecimiento por dispersión y un tamaño fino de grano.

Los **aceros de fase dual** muestran una distribución uniforme de ferrita y martensita, ésta última dispersa, lo que da límites elásticos de 415 a 1,000 MPa. Estos aceros al bajo carbono no contienen suficientes elementos de aleación para tener buena templabilidad usando los procesos normales de revenido. Pero, cuando el acero se calienta en la parte de ferrita más austenita del diagrama de fases, la fase de austenita se enriquece en carbono y el material logra la templabilidad necesaria. Durante el templado, sólo la parte de austenita se transforma en martensita [figura 13-23*a*)].

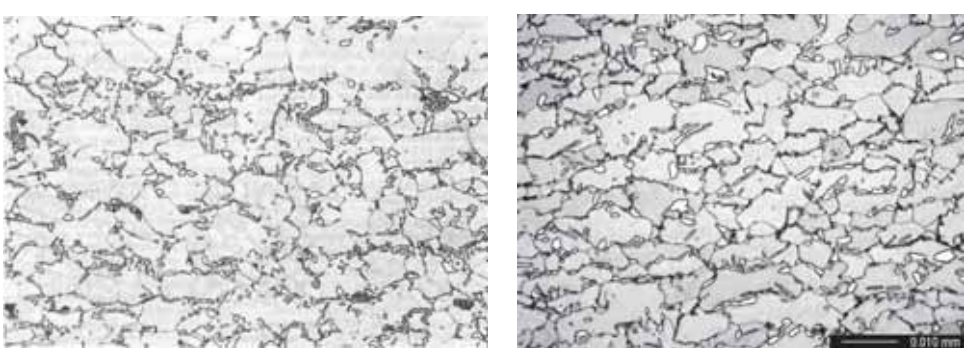
Dentro de la categoría conocida como aceros de plasticidad inducida de transformación, o **aceros TRIP**, la deformación causa que la austenita retenida metaestable se transforme en martensita o bainita (es decir, la transformación de fase es inducida por la plasticidad). La microestructura que resulta es un compuesto de fases múltiples: martensita, bainita y austentita retenida restante en una matriz de ferrita dulce. Los aceros TRIP se distinguen por mostrar una combinación de alta resistencia (tanto a la tensión como a la fluencia) y alta ductilidad debido a una gran rapidez de templado. Con frecuencia, estos aceros se utilizan para fabricar partes para automóviles. La figura 13-23 *b*) muestra la microestructura de un acero TRIP.

Los **aceros martensíticos envejecibles** son aceros bajos en carbono y altamente aleados. Se austenitizan y templan para producir una martensita blanda que contiene menos de 0.3% de C. Cuando la martensita se envejece a unos 500°C se precipitan compuestos intermetálicos como el Ni_3Ti, Fe_2Mo y Ni_3Mo.

Los **aceros sin intersticios** contienen Nb y Ti. Reaccionan con C y S para formar precipitados de carburos y sulfuros. Entonces, prácticamente no queda carbono en la ferrita. Estos aceros son de fácil conformación y, por lo tanto, son atractivos para la industria automotriz.

Los aceros de grano orientado que contienen silicio se usan como materiales magnéticos blandos y se usan en núcleos para transformadores. Casi polvo puro de hierro (conocido como carbonilo de hierro), que se obtiene por la descomposición de pentacarbonilo de hierro [$Fe(CO)_5$] y a veces un tratamiento térmico reductor, se usa para producir materiales magnéticos. El polvo puro de hierro se usa también como aditivo para suplementos alimenticios en cereales para el desayuno y otros alimentos fortificados con hierro bajo el nombre de hierro reducido.

Como ya se mencionó, muchos aceros también están recubiertos, por lo general para obtener buena protección contra la corrosión. El acero *galvanizado* está recubierto con una delgada capa de zinc (capítulo 23), el acero *terne* está bañado en plomo, y otros aceros tienen recubrimiento de aluminio o estaño.



***a*)** ***b*)**

Figura 13-23 *a*): Microestructura de un acero de fase dual, que muestra islas de martensita blanca en una matriz de ferrita gris claro. *b*) Microestructura de un acero TRIP, que muestra ferrita (gris claro) + bainita (negro a lo largo de límites de grano) + austenita retenida (blanca). (*D.P. Hoydick, D.M. Haezebrouck y E.A. Silva, United States Steel Corporation Research and Technology Center, 2005*.)[Metals Handbook, *edición de escritorio (1998), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

13-8 Tratamientos superficiales

Es posible producir, por medio de un tratamiento térmico apropiado, una estructura que sea dura y fuerte en la superficie, lo que otorga una excelente resistencia al desgaste y la fatiga, pero al mismo tiempo da un núcleo blando, dúctil y tenaz que proporciona buena resistencia a la falla por impacto. En el capítulo 5, cuando se estudió la difusión, se analizaron principios del carburizado. En esta sección, se ven este y otros procesos similares.

Calentamiento selectivo de la superficie

Se podría empezar por calentar rápidamente la superficie de un acero al medio carbono por encima de la temperatura A_3 (el centro continúa por debajo de A_1). Después de templar el acero, el centro es todavía una mezcla blanda de ferrita y perlita, en tanto que la superficie es martensita (figura 13-24). La profundidad de la capa de martensita es la **profundidad de cementado**. El revenido produce la dureza deseada en la superficie. Es posible calentar en forma local la superficie usando una flama de gas, una bobina de inducción, un rayo láser o un haz electrónico. Se puede, si así se quiere, endurecer sólo áreas seleccionadas de la superficie que estén más sujetas a la falla por fatiga o por desgaste.

Carburizado y nitruración

Estas técnicas se refieren a la difusión controlada de carbono y nitrógeno, respectivamente (capítulo 5). Para otorgar una mejor tenacidad, es necesario iniciar con un acero bajo en carbono. Cuando se aplica el **carburizado**, el carbono se difunde en la superficie del acero a una temperatura por encima de la A_3 (figura 13-25). Se produce un alto contenido de carbono en la superficie debido a la rápida difusión y a la alta solubilidad del carbono en austenita. Cuando el acero es templado y revenido, la superficie se convierte en martensita revenida al alto carbono, en tanto que el centro ferrítico continúa blando y dúctil. El grosor de la superficie endurecida, de nuevo llamada profundidad de cementado, es mucho menor en aceros carburizados que en aceros endurecidos por flama o inducción.

El nitrógeno produce un efecto de endurecimiento similar al del carbono. En la **cianurización**, el acero se sumerge en un baño de cianuro líquido que permite que el carbono y el nitrógeno

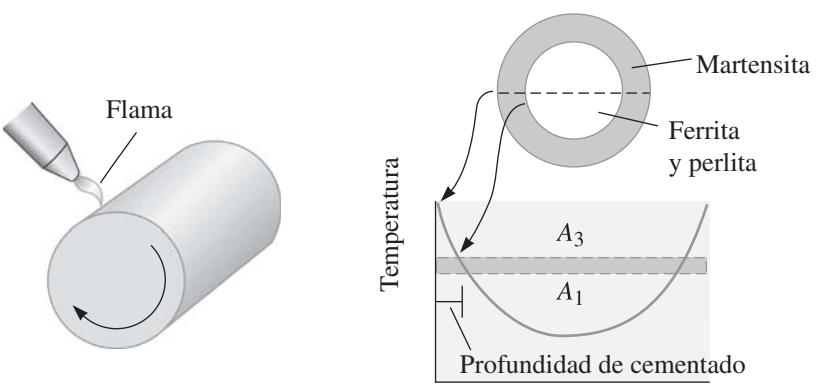


Figura 13-24 *a*) Endurecimiento superficial por calentamiento localizado. *b*) Sólo la superficie se calienta por encima de la temperatura A_1 y es templada para producir martensita.

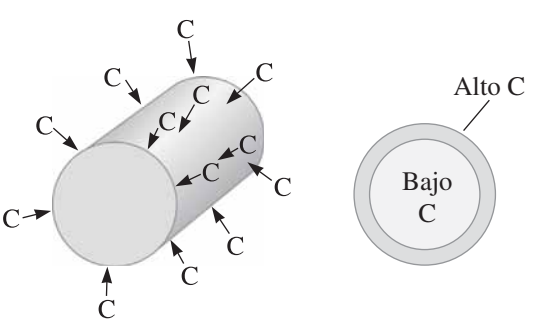


Figura 13-25 Carburizado de un acero al bajo carbono para producir una superficie al alto carbono, resistente al desgaste.

se difundan en el acero. Durante la **carbonitruración** se genera un gas que contiene monóxido de carbono y amoniaco, y tanto el carbono como el nitrógeno se difunden en el acero. Por último, en la **nitruración** sólo el nitrógeno se difunde en la superficie a partir de un gas. La nitruración se realiza por debajo de la temperatura A_1.

En cada uno de estos procesos se introducen esfuerzos residuales de compresión en la superficie, que proporcionan una excelente resistencia a la fatiga (capítulo 7) además de una buena combinación de dureza, resistencia y tenacidad. El siguiente ejemplo explica algunos aspectos de los tratamientos térmicos, como templado y revenido, además del endurecimiento superficial.

Ejemplo 13-7 *Diseño de tratamientos de endurecimiento superficial de un tren de engranes*

Seleccione los materiales y diseñe tratamientos térmicos del eje y del tren de engranes de un automóvil (figura 13-26).

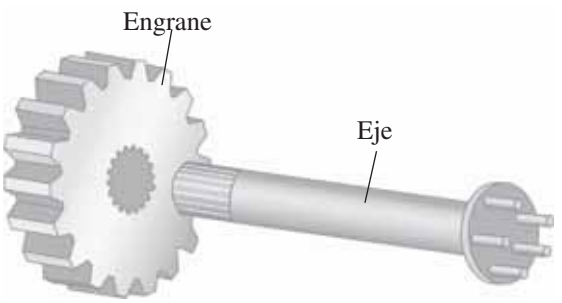


Figura 13-26 Bosquejo de un conjunto de eje y engrane (para el ejemplo 13-7).

SOLUCIÓN

Ambas piezas exigen adecuada resistencia a la fatiga. El engrane debe tener gran dureza para evitar el desgaste, y el eje resistencia general adecuada para resistir cargas de flexión y de torsión. Las dos piezas deben tener buena tenacidad. Por último, como se fabricarán millones de estas piezas, deben ser de bajo costo.

Los aceros de aleación templados y revenidos podrían aportar la combinación que se requiere de resistencia y tenacidad, pero los aceros de aleación son caros. A continuación se describe un método adicional para cada pieza.

El eje, que podría hacerse de un acero 1050 forjado que contenga una matriz de ferrita y perlita, podría ser endurecido en su superficie, quizá moviéndolo por una bobina de inducción para calentar selectivamente la superficie del acero por encima de la temperatura A_3 (unos 770°C). Después de que la bobina pasa cualquier lugar particular del eje, el interior frío templa la superficie a martensita. Luego, el revenido ablanda la martensita para mejorar la ductilidad. Esta combinación del contenido de carbono y del tratamiento térmico satisface las necesidades. El acero al bajo carbono es de bajo costo; el núcleo de ferrita y perlita produce buena tenacidad y resistencia, y la superficie endurecida proporciona resistencia adecuada a la fatiga y al desgaste.

El engrane está sujeto a condiciones más severas de carga, por lo cual el acero 1050 no garantiza la tenacidad, dureza y resistencia al desgaste suficientes. Por ello, carburizar un acero 1010 podría ser la solución. El acero original contiene en su mayor parte ferrita, que aporta buena ductilidad y tenacidad. Cuando se lleva a cabo un proceso de carburizado con gas por encima de la temperatura A_3 (unos 860°C), se introduce alrededor de 1.0% de C en una muy delgada capa superficial de los dientes del engrane. Este cementado al alto carbono, que se transforma en martensita durante el templado, se reviene para controlar la dureza. Ahora se obtiene tenacidad debido al núcleo de ferrita al bajo carbono, resistencia al desgaste debida a la superficie al alto carbono, y resistencia a la fatiga debida a la superficie de gran resistencia que contiene esfuerzos residuales por compresión introducidos durante el carburizado. Además, el acero 1010 al bajo carbono es un material inicial de bajo costo que es forjado fácilmente en una forma casi líquida antes del tratamiento térmico.

13-9 Soldabilidad del acero

En el capítulo 9 se estudió la soldadura y otros procesos de unión. Se observó que los aceros son los materiales estructurales de más amplio uso. En puentes, edificios y muchas otras aplicaciones, los aceros deben ser soldados. La integridad estructural de las estructuras de acero no sólo depende de la resistencia del acero, sino también de la que puedan ofrecer las uniones soldadas. Esta es la razón por la cual la soldabilidad del acero es siempre una consideración importante.

Muchos aceros al bajo carbono se sueldan con gran facilidad. La soldadura en aceros al medio y al alto carbono es comparativamente más difícil, porque con facilidad se puede formar martensita en la zona afectada por el calor, lo cual produce una soldadura con mala tenacidad. Para contrarrestar estos problemas se han ideado varias estrategias, por ejemplo, el precalentamiento del material o minimizar la incorporación de hidrógeno, recurso que hace quebradizo al acero. En aceros al bajo carbono, la resistencia de las regiones soldadas en estos materiales es más alta que el material base, lo cual se debe a la microestructura más fina de perlita que se forma durante el enfriamiento de la zona afectada por el calor. La austenita retenida a lo largo de los límites de granos de ferrita también limita la recristalización, y por lo tanto ayuda a retener un tamaño de grano fino, que contribuye a la resistencia de la región soldada. Durante la soldadura, el metal más cercano a la soldadura se calienta por encima de la temperatura A_1 y se forma austenita (figura 13-27). Durante el enfriamiento, la austenita en esta zona afectada por el calor se transforma en una nueva estructura, la cual depende de la rapidez de enfriamiento y del diagrama TEC del acero. Los aceros al bajo carbono tienen tan baja templabilidad que la rapidez normal de enfriamiento raras veces produce martensita; no obstante, puede ser necesario que un acero de aleación tenga que ser calentado antes para reducir la rapidez de enfriamiento, o ser calentado posteriormente para revenir cualquier martensita que se forme.

Un acero que está originalmente templado y revenido presenta dos problemas durante la soldadura. Primero, la parte de la zona afectada por el calor que se calienta arriba de la temperatura A_1 puede formar martensita después de enfriarse. En segundo término, la parte afectada por el calor debajo de A_1 puede revenirse demasiado. Por lo general, no debe soldarse un acero en condiciones de templado y revenido. El siguiente ejemplo muestra la forma en que la microestructura de la zona afectada por el calor puede ser tomada en cuenta para usar diagramas TEC.

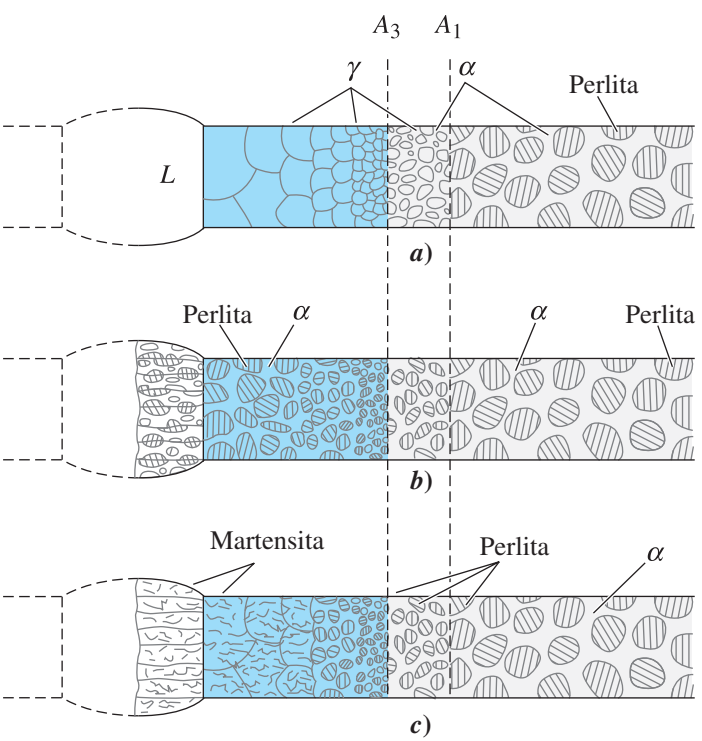


Figura 13-27 Desarrollo de la zona afectada por el calor en una soldadura: *a*) estructura a la máxima temperatura, *b*) estructura después de enfriarse de un acero de baja templabilidad y *c*) estructura después de enfriarse de un acero de alta templabilidad.

Ejemplo 13-8 ***Estructuras de zonas afectadas por calor***

Compare las estructuras de las zonas afectadas por el calor de soldaduras en aceros 1080 y 4340, si la velocidad de enfriamiento en la zona afectada por el calor es de 5°C/s.

SOLUCIÓN

De los diagramas TEC, figuras 13-14 y 13-16, la velocidad de enfriamiento en la soldadura produce las siguientes estructuras:

1080: 100% perlita

4340: bainita y martensita

La alta templabilidad del acero de aleación reduce su soldabilidad, lo cual permite que se forme martensita y que la soldadura se haga quebradiza.

13-10 Aceros inoxidables

Los **aceros inoxidables** se seleccionan debido a su excelente resistencia a la corrosión. Todos los aceros verdaderamente inoxidables contienen un mínimo de alrededor de 11% de Cr, lo cual permite que se forme una capa delgada y protectora de óxido de cromo cuando el acero se expone al oxígeno. El cromo es lo que hace inoxidables a este tipo de aceros. Es también un elemento *estabilizador de ferrita*. La figura 13-28*a*) ilustra el efecto del cromo en el diagrama de fases de hierro-carbono. El cromo hace que la región de austenita se contraiga, en tanto que la región de ferrita crece. Para composiciones al bajo carbono y alto cromo, la ferrita está presente como una sola fase hasta la temperatura de la curva final de solidus.

Existen varias categorías de aceros inoxidables basadas en su estructura cristalina y en el mecanismo de endurecimiento. Las propiedades comunes se presentan en la tabla 13-4.

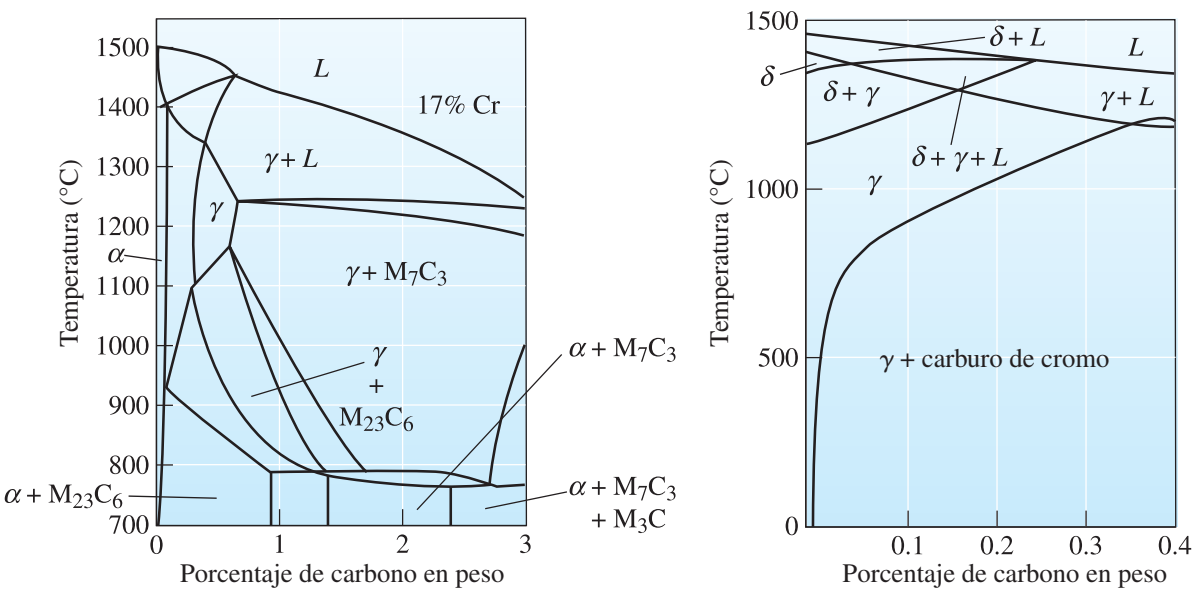


Figura 13-28 *a*) Efecto de 17% de cromo en un diagrama de fases de hierro-carbono. Con bajo contenido de carbono, la ferrita es estable en todas las temperaturas. Observe que "M" representa "metales" como el Cr y Fe u otras adiciones de aleación. *b*) Una sección del diagrama de fases de hierro-cromo-níquel-carbono a 18% Cr-8% Ni constantes. Con bajo contenido de carbono, la austenita es estable a temperatura ambiente.

Tabla 13-4 Composiciones y propiedades comunes de los aceros inoxidables

Acero	% C	% Cr	% Ni	Otros	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación	Condición
Austenítico								
201	0.15	17	5	6.5% Mn	655	310	40	Recocido
304	0.08	19	10		517	207	30	Recocido
					1275	965	9	Trabajado en frío
304L	0.03	19	10		517	207	30	Recocido
316	0.08	17	12	2.5% Mo	517	207	30	Recocido
321	0.08	18	10	0.4% Ti	586	241	55	Recocido
347	0.08	18	11	0.8% Nb	620	241	50	Recocido
Ferrítico								
430	0.12	17			448	207	22	Recocido
442	0.12	20			517	275	20	Recocido
Martensítico								
416	0.15	13		0.6% Mo	1240	965	18	Templado y revenido
431	0.20	16	2		1380	1035	16	Templado y revenido
440C	1.10	17		0.7% Mo	1965	1895	2	Templado y revenido
Endurecimiento por precipitación								
17-4	0.07	17	4	0.4% Nb	1310	1170	10	Endurecido por envejecimiento
17-7	0.09	17	7	1.0% Al	1655	1585	6	Endurecido por envejecimiento

Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos contienen hasta 30% de Cr y menos de 0.12% de C. Debido a la estructura CCCu, estos aceros tienen buena resistencia y moderada ductilidad derivadas del endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación. Además, son ferromagnéticos y no pueden ser sometidos a un tratamiento térmico. Tienen excelente resistencia a la corrosión, capacidad moderada de formación y son relativamente económicos.

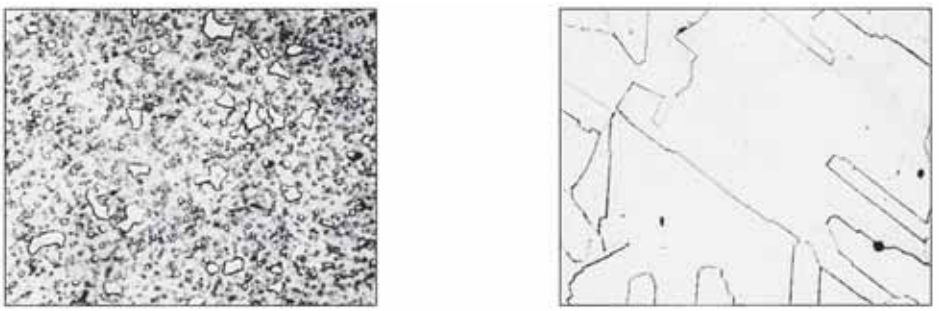
Aceros inoxidables martensíticos

En la figura 13-28*a*) se encuentra que una aleación de 17% de Cr-0.5% de C calentada a 1,200°C forma 100% de austenita, que se transforma en martensita cuando se la templa en aceite. Luego, la martensita se reviene para producir alta resistencia y dureza [figura 13-29*a*)]. Por lo general, el contenido de cromo es menor de 17%; de otro modo, el campo de austenita se vuelve tan pequeño que se requiere de un control muy estricto tanto de la temperatura de austenitización como del contenido de carbono. Contenidos de cromo más bajos también permiten que el contenido de carbono varíe de alrededor de 0.1 a 1.0%, lo cual permite que se produzcan martensitas de diferentes durezas. La combinación de dureza, fuerza y resistencia a la corrosión hace que las aleaciones sean atractivas para aplicaciones como cuchillería de alta calidad, cojinetes de bolas y válvulas.

Aceros inoxidables austeníticos

El níquel, que es un *elemento estabilizador de la austenita*, incrementa el tamaño del campo austenítico, al mismo tiempo que casi elimina la ferrita de las aleaciones de hierro-cromo-carbono [figura 13-28*b*)]. Si el contenido de carbono se encuentra por debajo de alrededor de 0.03%, los carburos no se forman y el acero es prácticamente sólo austenita a temperatura ambiente [figura 13-29*b*)].

Los aceros inoxidables austeníticos CCCa tienen excelente ductilidad, capacidad para su conformación y resistencia a la corrosión. La resistencia se obtiene por un extenso endurecimiento por solución sólida, y los aceros inoxidables pueden ser trabajados en frío para darles mayor resistencia que los aceros inoxidables ferríticos. No son ferromagnéticos, lo cual es una ventaja para numerosas aplicaciones. Por ejemplo, a veces se hacen "stents" (cánulas) cardiovasculares de aceros inoxidables 316. Los aceros tienen excelentes propiedades de impacto a baja temperatura porque no tienen temperatura de transición. Desafortunadamente, el alto contenido de cromo y níquel incrementan el costo de estas aleaciones. La aleación 304 que contiene 18% de Cr y 8% de Ni (también conocida como inoxidable 18-8) es el grado de más amplio uso del acero inoxidable. Aun cuando es



a) *b*)

Figura 13-29 *a*) Acero inoxidable martensítico que contiene carburos primarios grandes y carburos pequeños formados durante el revenido (350 ×). *b*) Acero inoxidable austenítico (500 ×). [*De* ASM Handbook, *vols. 7 y 8 (1972, 1973), ASM International, Materials Park, OH44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

inoxidable, esta aleación puede experimentar **sensitización**. Cuando se calienta a una temperatura de ~480-860°C, se precipita carburo de cromo a lo largo de límites de granos en vez de hacerlo adentro de estos. Esto provoca un agotamiento de cromo en el interior de los granos y hace que el acero inoxidable se corroa muy fácilmente.

Aceros inoxidables endurecidos por precipitación [EP]

Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación (o EP) contienen Al, Nb o Ta y derivan sus propiedades a partir del endurecimiento por solución sólida, endurecimiento por deformación, endurecimiento por envejecimiento y la reacción martensítica. Primero, el acero se calienta y se templa para permitir que la austenita se transforme en martensita. Un recalentamiento permite que se formen precipitados como el Ni_3Al a partir de la martensita. Se obtienen altas resistencias incluso con un bajo contenido de carbono.

Aceros inoxidables dúplex

En algunos casos, deliberadamente se introducen mezclas de fases en la estructura del acero inoxidable. Por medio de un control apropiado de la composición y del tratamiento térmico, se puede producir un **acero inoxidable dúplex** que contiene aproximadamente 50% de ferrita y 50% de austenita. Esta combinación produce un conjunto de propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, así como capacidad para la conformación y soldadura que no se obtienen en ninguno de los aceros inoxidables usuales.

La mayoría de los aceros inoxidables son reciclables y el siguiente ejemplo muestra la forma en que se pueden usar las diferencias entre sus propiedades para separar distintos tipos de aceros inoxidables.

Ejemplo 13-9 *Diseño de una prueba para separar aceros inoxidables*

Para reciclar chatarra de acero inoxidable de manera eficiente, se desea separar el acero inoxidable al alto níquel de acero inoxidable al bajo níquel. Diseñe un método para realizar esta tarea.

SOLUCIÓN

Realizar un análisis químico en cada pieza de chatarra es tedioso y caro. Clasificarlas con base en la dureza puede ser menos costoso, pero debido a los diferentes tipos de tratamientos, por ejemplo recocido, trabajo en frío o templado y revenido, la dureza puede no estar relacionada con la composición del acero.

Por lo general, los aceros inoxidables al alto níquel son austeníticos, mientras que las aleaciones al bajo níquel son ferríticas y martensíticas. Un imán ordinario será atraído por los aceros al bajo níquel ferríticos y martensíticos, pero no será atraído por el acero al alto níquel austenítico. Se podría especificar esta sencilla y poco costosa prueba magnética para realizar el proceso de separación.

13-11 Hierros fundidos

Los **hierros fundidos** son aleaciones de hierro-carbono-silicio, que por lo general contienen 2-4% de C y 0.5-3% de Si, que fueron sometidos a la reacción eutéctica durante su solidificación. Las microestructuras de los cinco tipos importantes de hierros fundidos se muestran en la figura 13-30.

Reacción eutéctica en hierros fundidos

Con base en el diagrama de fases de Fe-Fe_3C (líneas discontinuas en la figura 13-31), la reacción eutéctica que ocurre en aleaciones de Fe-C a 1,140°C es

$$L \rightarrow \gamma + Fe_3C \qquad (13\text{-}1)$$

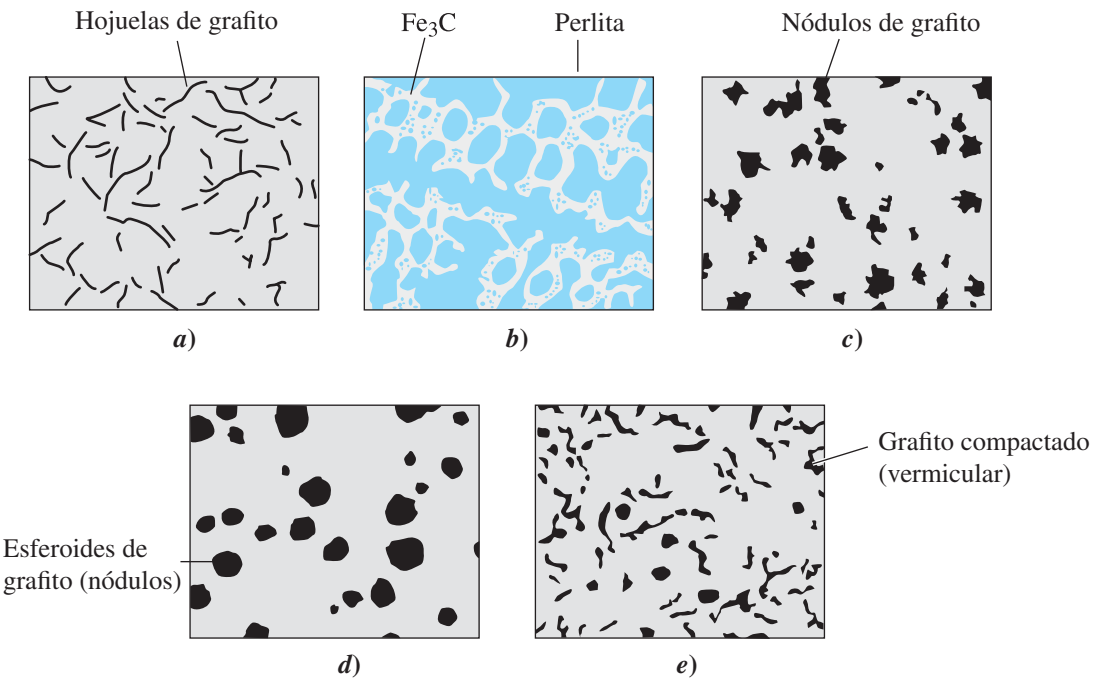


Figura 13-30 Dibujos esquemáticos de los cinco tipos de hierro fundido: *a*) hierro gris, *b*) hierro blanco, *c*) hierro maleable, *d*) hierro dúctil y *e*) hierro con grafito compactado.

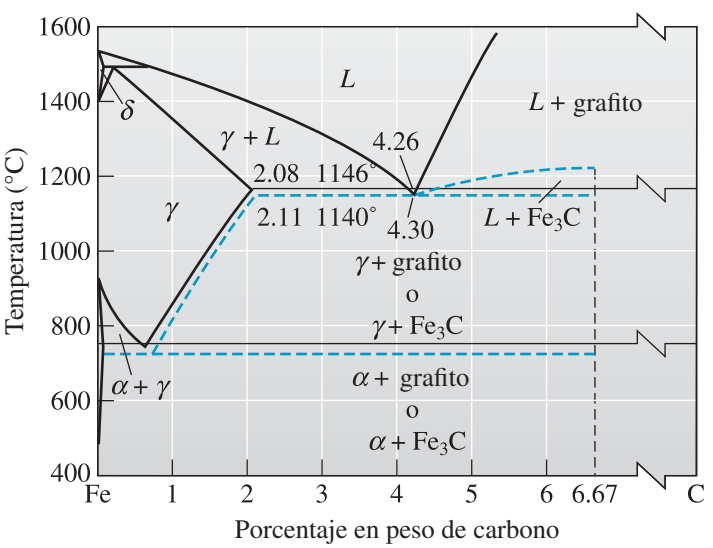


Figura 13-31 Diagrama de fases de hierro-carbono que muestra la relación entre equilibrios estables de hierro-grafito (líneas continuas) y las reacciones metaestables de hierro-cementita (líneas discontinuas).

Esta reacción produce **hierro fundido blanco**, con una microestructura compuesta de Fe_3C y perlita. No obstante, el sistema Fe-Fe_3C es en realidad un diagrama de fases metaestable. Bajo condiciones verdaderamente de equilibrio, la reacción eutéctica es

$$L \rightarrow \gamma + \text{grafito} \tag{13-2}$$

El diagrama de fases de Fe-C se ilustra mediante líneas continuas en la figura 13-31. Cuando ocurre la reacción eutéctica estable de $L \rightarrow \gamma$ + grafito a 1,146°C, se forma hierro fundido gris, dúctil o con grafito compactado.

En aleaciones de Fe-C, el líquido fácilmente se subenfría 6°C (la diferencia entre las temperaturas eutécticas estables y metaestables), y se forma hierro blanco. Agregar alrededor de 2% de silicio al hierro incrementa la diferencia de temperatura entre las eutécticas, lo que permite que sean tolerados subenfriamientos más grandes y más tiempo para la nucleación y crecimiento del grafito eutéctico estable. Por lo tanto, el silicio es un elemento *estabilizador del grafito*. Elementos como el cromo y el bismuto tienen el efecto opuesto y estimulan la formación de hierro fundido blanco. También se pueden introducir inoculantes, como el silicio (en forma de ferrosilicio Fe-Si), para estimular la formación de núcleos de grafito, o es posible reducir la rapidez de enfriamiento de la pieza colada para dar más tiempo para que el grafito crezca.

El silicio también reduce la cantidad de carbono que contiene el eutéctico. Se puede tomar en cuenta este efecto al definir el **equivalente de carbono** (EC):

$$\text{EC} = \%\,\text{C} + \tfrac{1}{3}\,\%\,\text{Si} \tag{13-3}$$

La composición eutéctica está siempre cercana a 4.3% de EC. Un carbono equivalente alto estimula el crecimiento del grafito eutéctico.

Reacción eutectoide en los hierros fundidos

La estructura de la matriz y las propiedades de cada tipo de hierro fundido son determinadas por la forma en que la austenita se transforma durante la reacción eutectoide. En el diagrama de fases de Fe-Fe_3C que se emplea para los aceros, la austenita se transformó en ferrita y cementita, a veces en forma de perlita; no obstante, el silicio también estimula la reacción autectoide *estable*:

$$\gamma \rightarrow \alpha + \text{grafito} \tag{13-4}$$

Bajo condiciones de equilibrio, se difunden átomos de carbono desde la austenita a las partículas existentes de grafito, y queda atrás la ferrita al bajo carbono. El diagrama de transformación (figura 13-32) describe cómo podría transformarse la austenita durante el tratamiento térmico. El **recocido** (o enfriamiento en horno) del hierro fundido da una matriz ferrítica blanda (no perlita gruesa como

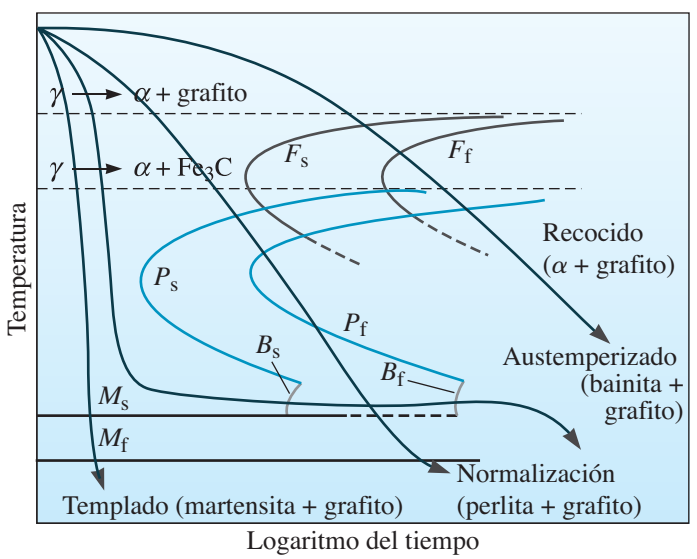


Figura 13-32 Diagrama de transformación de austenita en hierro fundido.

a) *b*)

Figura 13-33 *a*) Bosquejo y *b*) micrografía del grafito en hojuelas en hierro fundido gris (100 ×). (*Reimpreso por cortesía de Don Askeland.*)

en los aceros). La normalización, o enfriado al aire, da una matriz perlítica. Los hierros fundidos también pueden someterse a un austemperizado en la fase austenítica para producir bainita o pueden ser templados a martensita y revenidos. El hierro dúctil austemperizado, con resistencias de hasta 1380 MPa, se usa para engranajes de alto desempeño.

La **fundición de hierro gris** contiene pequeñas hojuelas de grafito interconectadas que producen resistencia y ductilidad bajas. Este es el hierro fundido que más se usa y recibe ese nombre por el color gris deslustrado de la superficie fracturada. El hierro fundido gris contiene muchos conglomerados, o **celdas eutécticas**, de hojuelas interconectadas de grafito (figura 13-33). El punto en el que las hojuelas están conectadas es el núcleo original de grafito. La inoculación ayuda a producir celdas eutécticas más pequeñas, lo cual mejora la resistencia. Los hierros grises están especificados por un número de clase de 20 a 80. Un hierro gris clase 20 tiene una resistencia nominal a la tensión de 138 MPa. En piezas coladas gruesas, las hojuelas de grafito gruesas y una matriz de ferrita producen resistencias a la tensión tan bajas como 83 MPa (figura 13-34), en tanto que, en piezas coladas delgadas, el grafito y la perlita forman y dan resistencias a la tensión de cerca de 275 MPa. Se obtienen resistencias más altas cuando se reduce el equivalente de carbono, por aleación o por tratamiento térmico. Aun cuando las hojuelas de grafito concentran esfuerzos y producen resistencia y ductilidad bajas, el hierro gris tiene varias propiedades atractivas, entre ellas alta resistencia a la compresión, buena capacidad para ser maquinado, buena resistencia al desgaste por deslizamiento, buena resistencia a la fatiga térmica, buena conductividad térmica y buen amortiguamiento de vibraciones.

La **fundición de hierro blanco** es una aleación dura y quebradiza que contiene grandes cantidades de Fe_3C. Una superficie fracturada de este material aparece blanca y de ahí su nombre. Se

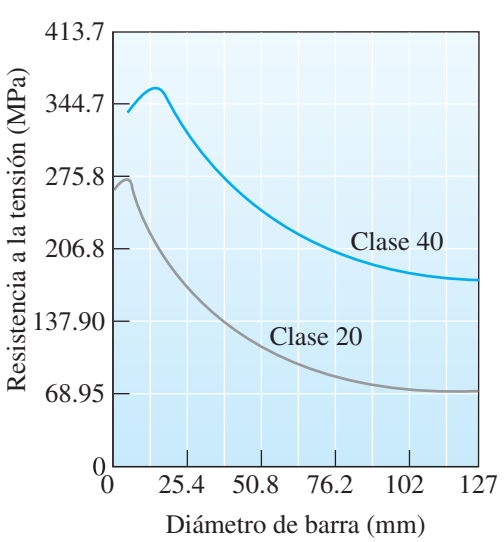


Figura 13-34 Efecto de la velocidad de enfriamiento o tamaño de una pieza colada en las propiedades de tensión de dos piezas de hierro fundido gris.

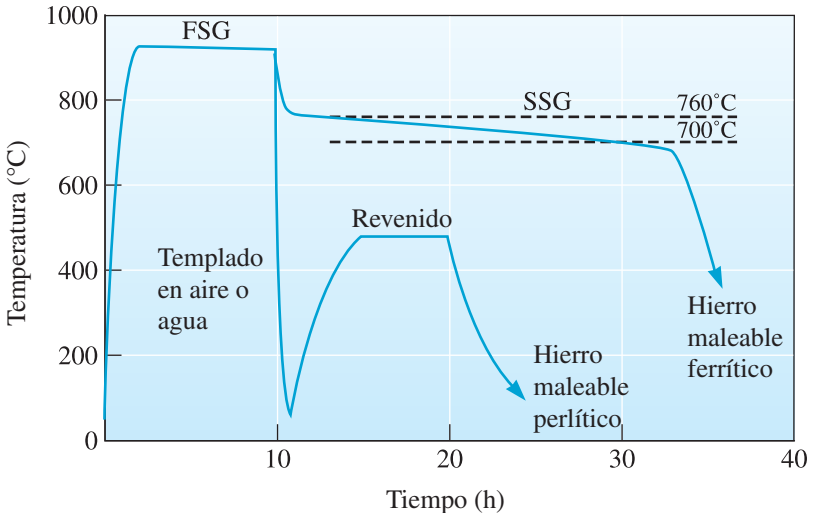


Figura 13-35 Tratamientos térmicos de hierros maleables ferríticos y perlíticos.

usa un grupo de hierros blancos altamente aleados por su dureza y resistencia al desgaste abrasivo. Elementos como el cromo, níquel y molibdeno se agregan para que, además de los carburos de aleación formados durante la solidificación, se forme martensita durante el tratamiento térmico subsiguiente.

La **fundición maleable** formada por el tratamiento térmico del hierro fundido blanco produce agrupamientos redondeados de grafito. Tiene mejor ductilidad que las fundiciones de hierro grises o blancas. También presenta muy buena facilidad para ser maquinado. El hierro maleable se produce por tratamiento térmico del hierro blanco no aleado y 3% de carbono equivalente (2.5% de C, 1.5% de Si). Durante el tratamiento térmico, se descompone la cementita formada durante la solidificación y se producen bloques, o nódulos. A veces, los nódulos, o carbono de revenido, se asemejan a palomitas de maíz. La forma redondeada del grafito permite una buena combinación de resistencia y ductilidad. La producción de hierro maleable requiere de varios pasos (figura 13-35). Se forman núcleos de nódulos de grafito cuando se calienta lentamente hierro blanco. Durante la **primera etapa de grafitización** (PEG) se descompone la cementita en austenita estable y en fases de grafito cuando el carbono del Fe_3C se difunde en los núcleos de grafito. A continuación de la PEG, la austenita se transforma durante el enfriamiento. La figura 13-36 muestra la microestructura del hierro blanco original (*a*) y los dos tipos de hierro maleable que se pueden producir (*b* y *c*). Para obtener *hierro maleable ferrítico*, la pieza colada se enfría lentamente en toda la escala de temperatura eutectoide para producir una **segunda etapa de grafitización** (SEG). El hierro maleable ferrítico tiene buena tenacidad comparada con la de otros hierros, porque su equivalente de carbono bajo reduce la temperatura de transición por debajo de la temperatura ambiente. El *hierro maleable perlítico* se obtiene cuando la austenita se enfría al aire o en aceite para formar perlita o martensita. En cualquier caso, la matriz es dura y quebradiza. El hierro se reviene entonces a una temperatura por debajo de la eutectoide. El **revenido** es un tratamiento térmico que reviene la martensita o esferoidiza la perlita. Una temperatura más alta de revenido disminuye la resistencia e incrementa la ductilidad y tenacidad.

El **hierro fundido dúctil** o **nodular** [figura 13-36 *d*), *e*) y *f*)] contiene partículas esferoidales de grafito. El hierro dúctil se produce por tratamiento del hierro líquido con un carbono equivalente de cerca de 4.3% con magnesio, lo cual hace crecer el grafito esferoidal (llamados nódulos) durante la solidificación, en lugar de hacerlo durante el prolongado tratamiento térmico. Se requieren varios pasos para producir este hierro. Estos pasos incluyen la desulfuración, **nodulación** e inoculación. En la desulfuración, cualquier azufre y oxígeno en el metal líquido es eliminado al agregar agentes desulfurizantes como el óxido de calcio (CaO). En la nodulación, se agrega Mg, por lo general en forma diluida como en una aleación de MgFeSi. Si se agrega Mg puro, la reacción de formación de nódulos es muy violenta, porque el punto de fusión del Mg es mucho menor que la temperatura del hierro líquido, y casi todo el Mg se perderá. Un residuo de alrededor de 0.03% de Mg debe estar en el

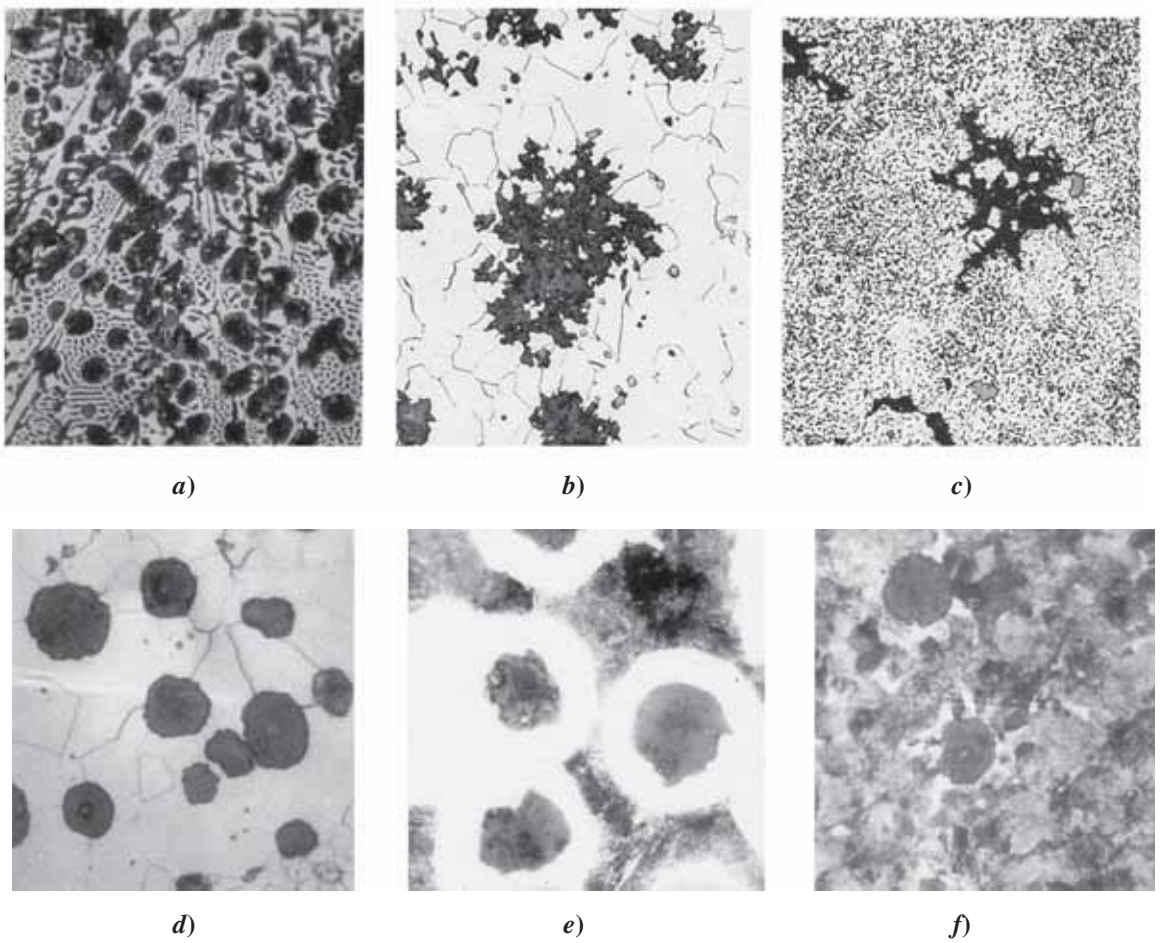


Figura 13-36 *a*) Hierro fundido blanco antes de tratamiento térmico (100 ×). *b*) Hierro maleable ferrítico con nódulos de grafito y pequeñas inclusiones de MnS en una matriz de ferrita (200 ×). *c*) Hierro maleable perlítico revenido para producir una matriz de martensita revenida (500 ×). [*Las imágenes b) y c) son del* ASM Handbook, *vols.7 y 8(1972, 1973),ASM International, Materials Park, OH44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.] *d*) Hierro dúctil recocido con una matriz de ferrita (250 ×). *e*) Hierro dúctil fundido con una matriz de ferrita (blanca) y perlita (250 ×). *f*) Hierro dúctil normalizado con una matriz de perlita (250 ×). [*Las imágenes a), d), e) y f) se reimprimen por cortesía de Don Askeland.*]

hierro líquido después del tratamiento para que crezca el grafito esferoidal. Por último, es esencial la **inoculación** con compuestos de FeSi para provocar nucleación heterogénea del grafito; si la inoculación no es eficaz, se formará hierro blanco en lugar de hierro dúctil. En consecuencia, el hierro nodulizado y el inoculado deben vaciarse en moldes después de muy pocos minutos para evitar su degradación. La **degradación** ocurre por la gradual y no violenta pérdida de Mg debida a la vaporización y/o reacción con oxígeno, que genera grafito en escamas o compactado en lugar de grafito esferoidal. Además, el efecto inoculante también se degrada, lo cual produce un hierro blanco.

En comparación con el hierro gris, el hierro fundido dúctil tiene excelente resistencia y ductilidad. Debido al mayor contenido de silicio (por lo general alrededor de 2.4%) en los hierros dúctiles en comparación con 1.5% de Si en los hierros maleables, los primeros son más fuertes pero no tan tenaces como los segundos.

El **hierro fundido con grafito compactado** contiene grafito compactado pero interconectado, que también se produce durante la solidificación. La forma del grafito en el hierro fundido, con grafito compactado, es intermedia entre escamas y esferas con numerosas barras redondas de grafito

Tabla 13-5 Propiedades comunes de los hierros colados

	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación	Observaciones
Hierros grises				
Clase 20	83–276	—	—	
Clase 40	190–370	—	—	
Clase 60	305–455	—	—	
Hierros maleables				
32510	345	225	10	Ferrítico
35018	365	242	18	Ferrítico
50005	483	345	5	Perlítico
70003	585	485	3	Perlítico
90001	725	620	1	Perlítico
Hierros dúctiles				
60–40–18	415	276	18	Recocido
65–45–12	450	310	12	Ferrítico sin tratamiento
80–55–06	552	380	6	Perlítico sin tratamiento
100–70–03	690	483	3	Normalizado
120–90–02	830	620	2	Templado y revenido
Hierros con grafito compactado				
Baja resistencia	276	193	5	90% ferrítico
Alta resistencia	448	379	1	80% perlítico

interconectadas al núcleo de la celda eutéctica. Este grafito compactado, a veces llamado **grafito vermicular**, también se forma cuando el hierro dúctil se degrada. El grafito compactado permite obtener características de resistencia y ductilidad que superan a las del hierro fundido gris, pero permiten que el Fe retenga propiedades de buena conductividad térmica y amortiguamiento de vibraciones. El tratamiento que se aplica al hierro con grafito compactado es similar al del hierro dúctil, pero sólo 0.015% de Mg se introduce durante la formación de nódulos. Se agrega una pequeña cantidad de titanio (Ti) para asegurar la formación del grafito compactado.

Las propiedades comunes de los hierros colados se dan en la tabla 13-5.

Resumen

- Las propiedades de los aceros, determinadas por endurecimiento por dispersión, dependen de la cantidad, tamaño, forma y distribución de la cementita. Estos factores son controlados por aleaciones y tratamientos térmicos.
- Un recocido de proceso recristaliza los aceros trabajados en frío.
- La esferoidización produce Fe_3C grande, esferoidal y buenas características para maquinado en aceros al alto carbono.
- El recocido, que involucra un enfriamiento lento en horno después de la austenitización, produce una estructura perlítica gruesa.
- La normalización, que involucra un enfriamiento al aire después de la austenitización, produce una estructura perlítica fina y mayor resistencia en comparación con el recocido.
- En un recocido isotérmico, se obtiene perlita con una separación interlaminar uniforme, pues transforma la austenita a una temperatura constante.
- El austemperizado se usa para producir bainita, que contiene Fe_3C redondeado debido a una transformación isotérmica.

- Los tratamientos térmicos de templado y revenido requieren la formación y descomposición de la martensita, proceso que genera dispersiones excepcionalmente finas de Fe_3C redondo.
- Se pueden entender mejor los tratamientos térmicos mediante el uso de diagramas TTT, diagramas TEC y curvas de templabilidad.
- Los diagramas TTT describen cómo se transforma la austenita en perlita y bainita a una temperatura constante.
- Los diagramas TEC describen cómo se transforma la austenita durante un enfriamiento continuo. Estos diagramas señalan las magnitudes de enfriamiento necesarias para obtener martensita en tratamientos de templado y revenido.
- Las curvas de templabilidad comparan la facilidad con la cual diferentes aceros se transforman en martensita.
- Los elementos de aleación incrementan los tiempos necesarios para las transformaciones que señalan los diagramas TTT, reducen las magnitudes de velocidad de enfriamiento necesario para producir martensita en los diagramas TEC, y mejoran la templabilidad del acero.
- Los aceros y tratamientos térmicos especiales producen propiedades únicas o combinaciones de propiedades. De particular importancia son los tratamientos para endurecimiento superficial, como el carburizado, que producen una excelente combinación de resistencia a la fatiga e impactos. Los aceros inoxidables, que contienen un mínimo de 11% de Cr, tienen excelente resistencia a la corrosión.
- Los hierros colados, por definición, experimentan una reacción eutéctica durante su solidificación. Dependiendo de la composición y tratamiento, se forman ya sea γ y Fe_3C o γ y grafito durante la solidificación.

Glosario

Acero inoxidable dúplex Clase especial de aceros inoxidables que contiene una microestructura de ferrita y austenita.

Aceros martensíticos envejecibles Clase especial de aceros aleados que obtienen altas resistencias mediante una combinación de las reacciones martensítica y de endurecimiento por envejecimiento.

Aceros de fase dual Aceros especiales tratados para producir martensita dispersa en una matriz de ferrita.

Aceros inoxidables Grupo de aleaciones ferrosas que contienen por lo menos 11% de Cr, que proporciona extraordinaria resistencia a la corrosión.

Aceros para herramienta Grupo de aceros al alto carbono que produce combinaciones de alta dureza, tenacidad y resistencia a temperaturas altas.

Aceros sin intersticios Aceros que contienen Nb y Ti. Reaccionan con C y S para formar precipitados de carburos y sulfuros, y deja a la ferrita casi sin elementos intersticiales.

Aceros TRIP Grupo de aceros con microestructura formada por una matriz continua de ferrita, una segunda fase más dura (martensita y/o bainita), y austenita retenida. TRIP (Transformation Induced Plasticity, es decir, plasticidad inducida por transformación).

Arrabio Hierro fundido producido en un alto horno, también conocido como metal caliente. Contiene aproximadamente 95% de hierro, 4% de carbono, 0.3-0.9% de silicio, 0.5% de manganeso y 0.025-0.05% de azufre, fósforo y titanio.

Austenita retenida Austenita que no puede transformarse en martensita durante el templado debido a la expansión de volumen asociada con la reacción.

Austenitización Calentamiento de un acero o hierro fundido a una temperatura a la que se puede formar austenita homogénea. La austenitización es el primer paso en la mayoría de los tratamientos térmicos de aceros y hierros fundidos.

Bainitizado o austemplado Tratamiento térmico isotérmico por el cual la austenita se transforma en bainita.

Carbonitruración Endurecimiento de la superficie de acero con carbono y nitrógeno obtenidos a partir de una atmósfera especial de gas.

Carburizado Conjunto de técnicas para endurecimiento de superficies por medio de las cuales el carbono se difunde en el acero.

Celda eutéctica Agrupamiento de hojuelas de grafito que se produce durante la solidificación de hierro gris, todas ellas interconectadas a un núcleo común.

Cianuración Endurecimiento de la superficie del acero con carbono y nitrógeno obtenido de un baño de solución líquida de cianuro.

Curvas de templabilidad Gráficas que muestran el efecto de la rapidez de enfriamiento en la dureza del acero templado.

Deformación de la austenita metaestable (ausformado) Tratamiento térmico termomecánico en el que la austenita se deforma plásticamente por debajo de la temperatura A_1, y a continuación se puede transformar en bainita o martensita.

Degradación Pérdida de formación de nódulos o del efecto inoculador en hierros colados como función del tiempo, que permite cambios no deseables en la microestructura y propiedades del material.

Distancia Jominy Distancia desde el extremo templado de una barra de Jominy, relacionada con la velocidad de enfriamiento.

Equivalente de carbono Suma del porcentaje en peso de carbono más un tercio del porcentaje en peso de silicio en un hierro fundido.

Esferoidita Microconstituyente que contiene partículas gruesas de cementita esférica en una matriz de ferrita, que permite obtener excelentes características de maquinado en aceros al alto carbono.

Grafito vermicular Grafito interconectado, redondeado, que se forma durante la solidificación de hierro fundido. Esta es la forma deseada del hierro compactado con grafito, pero es una forma defectuosa del hierro dúctil.

Grietas por templado Grietas que se forman en la superficie del acero durante el templado, debido a esfuerzos residuales de tensión que se producen por el cambio de volumen que acompaña a la transformación de austenita en martensita.

Hierro fundido Aleación ferrosa que contiene suficiente carbono para que ocurra una reacción eutéctica durante la solidificación.

Hierro fundido blanco Hierro fundido que produce cementita en lugar de grafito durante la solidificación. Los hierros blancos son duros y quebradizos.

Hierro fundido con grafito compactado Hierro fundido tratado con pequeñas cantidades de magnesio y titanio para que el grafito crezca durante la solidificación como precipitado interconectado, en forma de coral, que muestra propiedades intermedias entre las del hierro gris y dúctil.

Hierro fundido dúctil Hierro fundido tratado con magnesio para que el grafito se precipite como esferas durante la solidificación, lo que permite obtener excelente resistencia y ductilidad. (También se conoce como hierro fundido *nodular*.)

Hierro fundido gris Hierro fundido que durante la solidificación contiene hojuelas de grafito, lo que provoca baja resistencia y mala ductilidad. Es el tipo de hierro fundido que más se emplea.

Hierro fundido maleable Hierro fundido que se obtiene por medio de un tratamiento térmico prolongado, durante el cual la cementita se descompone para producir grupos redondeados de grafito. Como resultado de esta estructura se obtiene buena resistencia, ductilidad y tenacidad.

Horno de arco eléctrico Horno que se emplea para fundir chatarra de acero por medio de electricidad. A veces, en ellos se fabrican aceros especiales.

Inoculación Adición de un agente al hierro fundido, que produce lugares de formación de núcleos en los que el grafito se precipita durante la solidificación.

Martensita revenida Microconstituyente de ferrita y cementita que se forma cuando se reviene la martensita.

Metal caliente Hierro fundido, que se produce en un alto horno, al que también se le conoce como arrabio. Contiene aproximadamente 95% de hierro, 4% de carbono, 0.3-0.9% de silicio, 0.5% de manganeso y 0.025-0.05% de azufre, fósforo y titanio.

Nitruración Endurecimiento de la superficie del acero con nitrógeno que se logra a partir de una atmósfera especial gaseosa.

Nodulación Adición de magnesio al hierro fundido para que el grafito se precipite como esferas, en lugar de escamas, durante la solidificación.

Normalizado Tratamiento térmico sencillo que se obtiene luego de austenitizar y enfriar al aire para producir una estructura perlítica fina. Este proceso puede aplicarse a aceros y hierros fundidos.

Pico de endurecimiento secundario Dureza inusualmente alta de acero revenido a alta temperatura, provocada por la precipitación de carburos de aleación.

Primera etapa de grafitización Primer paso del tratamiento térmico de un hierro maleable, durante el cual los carburos formados durante la solidificación se descomponen en grafito y austenita.

Profundidad de cementado Profundidad bajo la superficie de un acero a la que ocurre endurecimiento por medio de procesos de endurecimiento y carburizado de la superficie.

Prueba de Jominy Prueba que se utiliza para evaluar la templabilidad. Una barra de acero austenitizado se templa sólo en un extremo, lo que produce una escala de magnitudes de enfriamiento a lo largo de la barra.

Recocido [acero] Tratamiento térmico que se emplea para producir perlita gruesa y blanda en el acero por austenitización, y posterior enfriamiento en horno.

Recocido [hierro fundido] Tratamiento térmico que se emplea para producir una matriz de ferrita en un hierro fundido, por la transformación de la austenita mediante enfriamiento en horno.

Recocido de proceso Tratamiento térmico a baja temperatura que se emplea para eliminar todo o parte del efecto del trabajo en frío en aceros.

Recocido isotérmico Tratamiento térmico de un acero por austenitización, que implica enfriar rápidamente a una temperatura entre A_1 y la nariz de la curva TTT, y mantenerla hasta que la austenita se transforme en perlita.

Revenido Recalentamiento de un hierro maleable para reducir la cantidad de carbono combinado como cementita, por esferoidización de perlita, revenido de martensita o grafitización de ambas.

Segunda etapa de grafitización Segundo paso del tratamiento térmico de hierros maleables que deben tener una matriz ferrítica. El hierro se enfría lentamente desde la temperatura de la primera etapa de grafitización, de modo que la austenita se transforma en ferrita y grafito en lugar de convertirse en perlita.

Sensitización Cuando se calientan a una temperatura de ~480-860°C, los carburos de cromo se precipitan a lo largo de los límites de grano en lugar de hacerlo dentro de estos, lo que provoca agotamiento de cromo en el interior. Este fenómeno provoca que el acero inoxidable se corroa muy fácilmente.

Templabilidad Facilidad con la que un acero puede ser templado para formar martensita. Los aceros con alta templabilidad forman martensita incluso con enfriamiento lento.

Templado arriba de Ms Templar austenita a una temperatura apenas arriba de la M_S, y mantenerla a ese nivel hasta que se iguale en todo el acero, antes de enfriar más para producir martensita. Este proceso reduce esfuerzos residuales y grietas por templado. (También se le conoce como templado *martensítico ininterrumpido*.)

Problemas

Sección 13-1 Designaciones y clasificación de los aceros

13-1 ¿Cuál es la diferencia entre hierro colado y aceros?

13-2 ¿Qué significan las temperaturas A_1, A_3 y A_{cm}? ¿Estas temperaturas son constantes?

13-3 Una fábrica requiere 15 libras de AISI 8620 por cada producto final. La fábrica produce 700 unidades diarias en tres turnos durante seis días por semana, 50 semanas al año. ¿Cuántas toneladas de itrio consume la fábrica al año si no se desperdicia nada?

13-4 Calcule las cantidades de ferrita, cementita, microconstituyente primario y perlita en los siguientes aceros:
a) 1015
b) 1035
c) 1095
d) 10130

13-5 Estime el número AISI-SAE de aceros que tengan las siguientes microestructuras:
a) 38% de perlita-62% de ferrita primaria
b) 93% de perlita-7% de cementita primaria
c) 97% de ferrita-3% de cementita
d) 86% de ferrita-14% de cementita

13-6 ¿Qué significan los términos acero al bajo, medio y alto carbono?

13-7 Dos muestras de acero contienen 93% de perlita. Estime el contenido de carbono de cada muestra si se sabe que una es hipoeutectoide y la otra hipereutectoide.

Sección 13-2 Tratamientos térmicos simples

Sección 13-3 Tratamientos térmicos isotérmicos

13-8 Explique los siguientes tratamientos térmicos:
a) recocido de proceso, *b*) austenitización, *c*) recocido, *d*) normalización y *e*) templado.

13-9 Defina el austemperizado (tratamiento térmico de bainitizado o austemplado) y explique su propósito.

13-10 Complete la siguiente tabla:

	Acero 1035	Acero 10115
Temperatura A_1		
Temperatura A_3 o A_{cm}		
Temperatura de recocido completo		
Temperatura de normalización		
Temperatura de recocido de proceso		
Temperatura de esferoidización		

13-11 Explique por qué, estrictamente hablando, se pueden usar diagramas TTT sólo para tratamientos isotérmicos.

13-12 Determine las constantes c y n en la relación de Avrami (ecuación 12-2), para la transformación de la austenita en perlita de un acero 1050. Suponga que el material ha sido sometido a un tratamiento térmico isotérmico a 600°C y trace una gráfica log-log de f contra t dada la siguiente información:

$$f = 0.2 \quad \text{a} \quad t = 2 \text{ s};$$
$$f = 0.5 \quad \text{a} \quad t = 4 \text{ s y}$$
$$f = 0.8 \quad \text{a} \quad t = 7 \text{ s}.$$

13-13 En un acero 1080 perlítico, las laminillas de cementita miden 0.4 μm de grueso, y las laminillas de ferrita miden 1.4μm de grueso. En un acero 1080 esferoidizado, las esferas de cementita miden 40 μm de diámetro. Estime el área total de la interfase entre la ferrita y la cementita en un centímetro cúbico de cada acero. Determine el porcentaje de reducción del área superficial cuando el acero perlítico se esferoidiza. La densidad de la ferrita es de 7,870 kg/m^3 y la de la cementita de 7,660 kg/m^3.

13-14 Describa la microestructura presente en un acero 1050 después de cada paso en los siguientes tratamientos térmicos:

a) calentar a 820°C, templar a 650°C y mantener así 90 s, y templar a 25°C;
b) calentar a 820°C, templar a 450°C y mantener así 90 s, y templar a 25°C;
c) calentar a 820°C, y templar a 25°C;
d) calentar a 820°C, templar a 720°C y mantener así 100 s, y templar a 25°C;
e) calentar a 820°C, templar a 720°C y mantener así 100 s, templar a 400°C y mantener así 500 s, y templar a 25°C;
f) calentar a 820°C, templar a 720°C y mantener así 100 s, templar a 400°C y mantener así 10 s, y templar a 25°C, y
g) calentar a 820°C, templar a 25°C, calentar a 500°C mantener así 10^3 s, y enfriar al aire a 25°C.

13-15 Describa la microestructura presente en un acero 10110 después de cada paso en los siguientes tratamientos térmicos:

a) calentar a 900°C, templar a 400°C, mantener así 10^3 s y templar a 25°C;
b) calentar a 900°C, templar a 600°C, mantener así 50 s y templar a 25°C;
c) calentar a 900°C y templar a 25°C;
d) calentar a 900°C, templar a 300°C, mantener así 200 s y templar a 25°C;
e) calentar a 900°C, templar a 675°C, mantener así 1 s y templar a 25°C;
f) calentar a 900°C, templar a 675°C, mantener así 1 s, templar a 400°C y mantener así 900 s, y enfriar lentamente a 25°C;
g) calentar a 900°C, templar a 675°C, mantener así 1 s, templar a 300°C y mantener así 103 s, y enfriar al aire a 25°C, y
h) calentar a 900°C, templar a 300°C, mantener así 100 s, templar a 25°C y calentar a 450°C durante 3,600 s, y enfriar a 25°C.

13-16 Recomiende tratamientos térmicos isotérmicos apropiados para obtener los siguientes aceros; incluya temperaturas y tiempos apropiados:

a) un acero 1050 recocido isotérmicamente con DRC 23;
b) un acero 10110 recocido isotérmicamente con DRC 40;
c) un acero 1080 recocido isotérmicamente con DRC 38;
d) un acero 1050 austemplado con DRC 40;
e) un acero 10110 austemplado con DRC 55, y
f) un acero 1080 austemplado con DRC 50.

13-17 Compare los tiempos mínimos que se requieren para recocer isotérmicamente los siguientes aceros a 600°C. Exponga el efecto del contenido de carbono del acero en la cinética de formación de núcleos y crecimiento durante el tratamiento térmico.

a) 1050
b) 1080
c) 10110

Sección 13-4 Tratamientos térmicos de templado y revenido

13-18 Explique los siguientes términos: *a*) templado, *b*) revenido, *c*) austenita retenida y *d*) temple arriba de *M*s temple martensítico ininterrumpido.

13-19 Los medios comunes que se emplean para templar incluyen aire, salmuera (10% de sal en agua), agua y aceites diversos.

a) Clasifique los cuatro medios en orden de velocidad de enfriamiento del más rápido al más lento.
b) Describa la situación cuando templar al aire no sería deseable.

c) Durante el templado en medios líquidos, por lo general se agita ya sea la pieza que está siendo enfriada o el baño. Explique por qué.

13-20 Se desea producir un acero 1050 que tenga una dureza Brinell de por lo menos 330 y una elongación de por lo menos 15%.

a) Recomiende un tratamiento térmico e incluya las temperaturas apropiadas que permitan lograr este resultado. Determine las resistencias a la fluencia y a la tensión que se obtienen con este tratamiento térmico.

b) ¿Qué resistencia a la fluencia y resistencia a la tensión se obtendrían en un acero 1080 si se usa el mismo tratamiento térmico? Vea la figura 12-27.

c) ¿Qué resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión y porcentaje de elongación se obtendrían en el acero 1050 si este fuera normalizado? Vea la figura 13-4.

13-21 Se desea producir un acero 1050 que tenga una resistencia a la tensión de por lo menos 1210 MPa y una reducción de área de por lo menos 50%.

a) Recomiende un tratamiento térmico que incluya las temperaturas apropiadas que permitan lograr este resultado. Determine el número de dureza Brinell, el porcentaje de elongación y la resistencia a la fluencia que se obtienen por este tratamiento térmico. Vea la figura 13-9.

b) ¿Qué resistencia a la fluencia y resistencia a la tensión se obtendrían en un acero 1080 usando el mismo tratamiento térmico? Vea la figura 12-27.

c) ¿Qué resistencias a la fluencia, resistencia a la tensión y porcentaje de elongación se obtendrían en el acero 1050 si fuera recocido? Vea a la figura 13-4.

13-22 A un acero 1030 se le da un tratamiento térmico inapropiado de templado y revenido, que produce una estructura final compuesta de 60% de martensita y 40% de ferrita. Estime el contenido de carbono de la martensita y la temperatura de austenitización que se usó. ¿Qué temperatura de austenitización recomendaría usted?

13-23 Un acero 1050 debe ser austenitizado a 820°C, templado en aceite a 25°C y revenido a 400°C durante un tiempo apropiado.

a) ¿Qué resistencia a la fluencia, dureza y porcentaje de elongación esperaría usted obtener por medio de este tratamiento térmico? Vea la figura 13-9.

b) Suponga que se encuentra que la resistencia a la fluencia real del acero es de 862 MPa. ¿Qué podría haber ocurrido en el tratamiento térmico que provocara esta baja resistencia?

c) Suponga que se encuentra que la dureza Brinell es DB 525. ¿Qué podría haber ocurrido en el tratamiento térmico que provocara esta alta dureza?

13-24 Una pieza de acero de baja aleación y 0.2% de C tiene una microestructura que contiene ferrita, perlita, bainita y martensita después de templarla. ¿Qué microestructura se obtendría si se usa un acero 1080? ¿Qué microestructura se obtendría si se usa un acero 4340? Vea las figuras 13-14, 13-15 y 13-16*b*).

13-25 Se encuentran perlita fina y una pequeña cantidad de martensita en un acero 1080 templado. ¿Qué microestructura se debería esperar si se usa un acero de baja aleación y 0.2% de C? ¿Qué microestructura se debería esperar si se usa un acero 4340? Vea las figuras 13-14, 13-15 y 13-16*b*).

13-26 Estime las fases formadas cuando una barra de acero 1080 se templa, desde ligeramente arriba de la temperatura eutectoide, bajo las siguientes condiciones:

a) aceite (sin agitación);
b) aceite (con agitación);
c) agua (con agitación), y
d) salmuera (sin agitación).

Sugiera un medio de templado si se desea obtener perlita gruesa. Consulte la figura 13-14 y la tabla 13-2 para este problema.

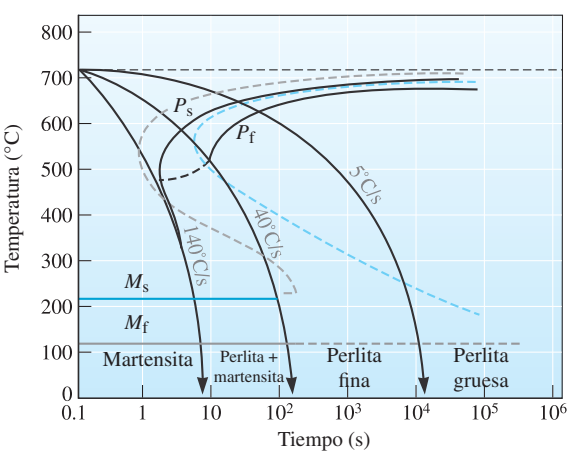


Figura 13-14 Diagrama TEC (líneas continuas) de un acero 1080 comparado con el diagrama TTT (líneas discontinuas). (Repetido para el problema 13-26.)

Sección 13-5 Efecto de los elementos de aleación

Sección 13-6 Aplicación de la templabilidad

13-27 Defina el ausformado (deformación de la austenita metaestable) y explique su propósito.

13-28 Explique la diferencia entre templabilidad y dureza. Explique, usando un diagrama, cómo se mide la templabilidad de los aceros.

13-29 Se ha encontrado que un acero 1070, cuando se austenitiza a 750°C, forma una estructura que contiene perlita y una pequeña cantidad de ferrita en los límites de granos que da resistencia y ductilidad aceptables. ¿Qué cambios en la microestructura, si los hay, se deberían esperar si el acero 1070 contuviera un elemento de aleación como el Mo o Cr? Explique su respuesta.

13-30 Con base en diagramas TTT, compare las capacidades de templabilidad de aceros 4340 y 1050, mediante la determinación de los tiempos necesarios para que ocurra la transformación isotérmica de la ferrita y la perlita (F_s, P_s y P_f) a 650 °C. Vea las figuras 13-8 y 13-16*a*).

13-31 Un acero 1095 endurecido por agua debe revenirse a 500°C, pero un operador negligente no revisa el control automático de procesos y se reviene a 450°C. ¿Cuál será la dureza del acero producido en comparación con el especificado?

13-32 Determine la rapidez de enfriamiento de los aceros AISI 9310, 4320 y 1080 para que obtengan la misma dureza. Vea la figura 13-21.

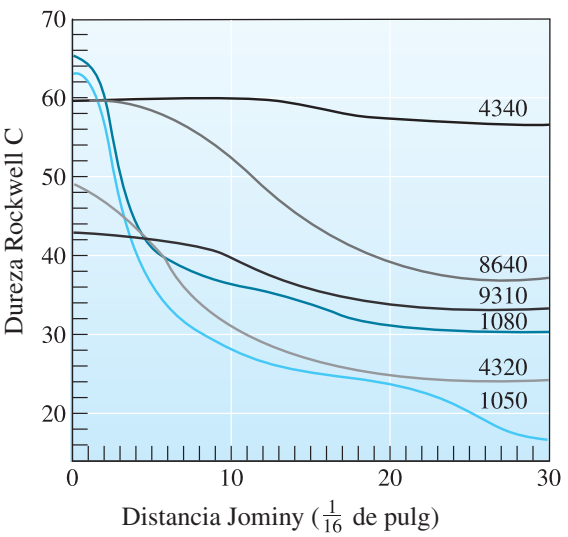


Figura 13-21 Curvas de templabilidad de varios aceros.

13-33 Se desea obtener una dureza de DRC 38 a 40 en un acero templado. ¿Qué intervalo de velocidad de enfriamiento se tendría que obtener para los siguientes aceros? ¿Algunos aceros son inapropiados para alcanzar estos niveles de dureza? (Vea la figura 13-21 y la tabla 13-3.)
a) 4340
b) 8640
c) 9310
d) 4320
e) 1050 y
f) 1080

13-34 Una pieza de acero debe tener cierta dureza después del templado de DRC 35 para evitar velocidades excesivas de desgaste durante su uso. Cuando la pieza se fabrica con acero 4320, la dureza es de sólo DRC 32. Determine la dureza si la pieza se hiciera bajo condiciones idénticas, pero con los siguientes aceros. ¿Cuáles de estos aceros, si los hay, serían mejores opciones que el 4320?
a) 4340
b) 8640
c) 9310
d) 1050 y
e) 1080

13-35 Una pieza de acero 4320 tiene una dureza de DRC 35 en un punto crítico después de templarla. Determine
a) la velocidad de enfriamiento en ese lugar, y
b) la microestructura y dureza que se obtendrían si la pieza se hiciera de acero 1080.

13-36 Un acero 1080 se enfría con la mayor rapidez posible que todavía permita que se forme sólo la perlita. ¿Cuál es la velocidad de enfriamiento? ¿Qué distancia Jominy y dureza se esperan de esta velocidad de enfriamiento?

13-37 Determine la dureza y microestructura en el centro de una barra de acero 1080 de 38.1 mm de diámetro s se la templa en
a) aceite sin agitación;
b) agua sin agitación, y
c) salmuera con agitación.

13-38 Una barra de acero 4320 de 50.8 mm de diámetro debe tener una dureza de al menos DRC 35. ¿Cuál es la mínima severidad del templado (coeficiente D)? ¿Qué tipo de medio para templado recomendaría usted para producir la dureza deseada, con la mínima probabilidad de agrietamiento por templado?

13-39 Una barra de acero se debe templar en agua con agitación. Determine el diámetro máximo de la barra que producirá una dureza mínima de DRC 40 si la barra es de acero
a) 1050
b) 1080
c) 4320
d) 8640 y
e) 4340

13-40 El centro de una barra de 25.4 mm de diámetro de acero 4320 tiene una dureza de DRC 40. Determine la dureza y microestructura en el centro de una barra de 50.8 mm de acero 1050 templado en el mismo medio.

13-41 ¿Cuál es el coeficiente H de una distancia Jominy de 12.7 mm y un diámetro de barra de 38.1 mm?

Sección 13-7 Aceros especiales

Sección 13-8 Tratamientos superficiales

Sección 13-9 Soldabilidad del acero

13-42 ¿Qué son los aceros para herramientas?

13-43 ¿Cuál es el principio del endurecimiento superficial de los aceros cuando se usa carburizado y nitruración?

13-44 Se va a carburizar un acero 1010 usando una atmósfera de gas que produce 1.0% de C en la superficie del acero. La profundidad del cementado se define como la distancia debajo de la superficie que contiene por lo menos 0.5% de C. Si se carburiza a 1000°C, determine el tiempo necesario para producir una profundidad de cementado de 0.01 pulgadas. (Repase el capítulo 5.)

13-45 Se va a carburizar un acero 1015 a 1,050°C durante dos horas usando una atmósfera gaseosa que produce 1.2% de C en la superficie del acero. Grafique el porcentaje de carbono contra, la distancia desde la superficie del acero. Si éste se enfría lentamente después del carburizado, determine la cantidad de cada fase y de cada microconstituyente a intervalos de 50.8 μm pulg desde la superficie. (Vea el capítulo 5.)

13-46 ¿Por qué la resistencia de la zona afectada por el calor es más alta en el caso de aceros al bajo carbono? ¿Cuál es la función de la austenita retenida en este caso?

13-47 ¿Por qué es fácil soldar aceros al bajo carbono, pero difícil hacerlo en aceros al alto carbono?

13-48 Se suelda un acero 1050. Después del enfriamiento, se obtienen durezas en la zona afectada por el calor en varios lugares desde el borde de la zona de fusión. Determine las durezas esperadas en cada punto si un acero 1080 se soldara bajo las mismas condiciones. Estime la microestructura en cada lugar del acero 1080 soldado.

Distancia desde el borde de la zona de fusión 1050	Dureza en soldadura
0.05 mm	DRC 50
0.10 mm	DRC 40
0.15 mm	DRC 32
0.20 mm	DRC 28

Sección 13-10 Aceros inoxidables

13-49 ¿Qué es un acero inoxidable? ¿Por qué tienen esa característica los aceros inoxidables?

13-50 Un excedente en el inventario de aceros inoxidables contiene 15 ton de acero 304, 5.2 ton de 304L, 1 ton de 216 y 4.7 ton de 440C. Un repunte del precio del molibdeno hace que valga la pena vender el acero. ¿Qué tanto molibdeno contiene cada uno de los aceros y cuál sería la masa total que se vendería?

13-51 Una fábrica de alimentos que está diseñada para utilizar 5.75 ton métricas de acero inoxidable 316, emplea 115% de esta especificación. ¿Cuántos moles de cromo deben refinarse para esta fábrica? Suponga que se pierde 5% en el proceso de refinado.

13-52 Se desea producir un acero inoxidable martensítico que contenga 17% de Cr. Recomiende un contenido de carbono y temperatura de austenitización que permita obtener 100% martensita durante el templado. ¿Qué microestructura se produciría si luego la martensita fuera revenida hasta formarse las fases de equilibrio?

13-53 De manera ocasional, cuando se suelda un acero inoxidable austenítico, el depósito de soldadura puede ser ligeramente magnético. Con base en el diagrama de fases de Fe-CrNi-C [figura 13-28*b*)], ¿qué fase esperaría usted que esté provocando el comportamiento magnético? ¿Por qué podría haberse formado esta fase? ¿Qué podría hacerse para restablecer el comportamiento no magnético?

Sección 13-11 Hierros fundidos

13-54 Defina el hierro fundido usando el diagrama de fases de Fe-Fe_3C.

13-55 Compare las temperaturas eutécticas de un hierro fundido Fe-4.3% C con una aleación Fe-3.6% C-2.1% Si. ¿Cuál aleación es más maquinable y por qué?

13-56 ¿Cuáles son los diferentes tipos de hierros fundidos? Explique usando un bosquejo.

13-57 Una barra de una pieza colada de hierro gris clase 40 tiene una resistencia a la tensión de 345 MP. ¿Por qué la resistencia a la tensión es mayor que la dada por el número de clase? ¿Cuál piensa usted que es el diámetro de la barra de prueba?

13-58 A usted le gustaría producir una pieza de hierro gris que se solidifique sin austenita primaria o grafito. Si el contenido de carbono del hierro es de 3.5%, ¿qué porcentaje de silicio debe agregarse?

Problemas de diseño

13-59 Se desea producir una placa de desgaste de acero de 50.8 mm para una unidad de trituración de roca. Para evitar el frecuente cambio de la placa de desgaste, la dureza debe ser mayor que DRC 38 hasta 6.35 mm de la superficie de

acero. El centro de la placa debe tener una dureza de no más de DRC 32 para asegurar alguna tenacidad. Sólo se dispone de templado en agua. Diseñe la placa, suponiendo que sólo dispone de los aceros dados en la figura 13-21.

13-60 Un acero 10110 templado y revenido tiene grietas superficiales que provocan que la pieza tratada térmicamente sea rechazada por el cliente. ¿Por qué se formaron las grietas? Diseñe un tratamiento térmico que incluya temperaturas y tiempos apropiados que minimicen estos problemas.

13-61 Diseñe un acero resistente a la corrosión para una bomba que transporta helio líquido a 4 K en un imán superconductor.

13-62 Diseñe un tratamiento térmico para un gancho hecho de una barra de acero de 25.4 mm de diámetro, que tiene una microestructura que contiene una mezcla de ferrita, bainita y martensita después del templado. Estime las propiedades mecánicas de su gancho.

13-63 Diseñe un tratamiento de recocido para un acero 1050. Asegúrese de incluir detalles de temperaturas, velocidad de enfriamiento, microestructuras y propiedades.

13-64 Diseñe un proceso para producir un eje de acero de 5 mm de diámetro que tenga excelentes tenacidad, resistencia al desgaste y a la fatiga. La dureza de la superficie debe ser al menos DRC 60, y la dureza a 100 μm bajo la superficie debe ser aproximadamente DRC 50. Describa el proceso e incluya detalles de la atmósfera para el tratamiento térmico, la composición del acero, temperaturas y tiempo.

Problemas por computadora

13-65 *Relaciones empíricas para transformaciones en aceros*. Un tratamiento térmico de aceros depende del conocimiento de las temperaturas A_1, A_3, A_{cm}, M_s y M_f. Es frecuente que los productores de acero proporcionen a sus clientes las fórmulas empíricas que definen estas temperaturas, como una función de las concentraciones del elemento de aleación. Por ejemplo, una de esas fórmulas descrita en la información del tema es

$$M_s(\text{en °C}) = 561 - 474(\%\text{C}) - 33(\%\text{Mn}) - 17(\%\text{Ni}) - 17(\%\text{ Cr}) - 21(\%\text{ Mo})$$

Edite un programa de cómputo que le solicite al usuario proporcionar información de las concentraciones de diferentes elementos de aleación, así como las temperaturas M_s y M_f. Suponga que la temperatura M_f es de 215°C por debajo de M_s.

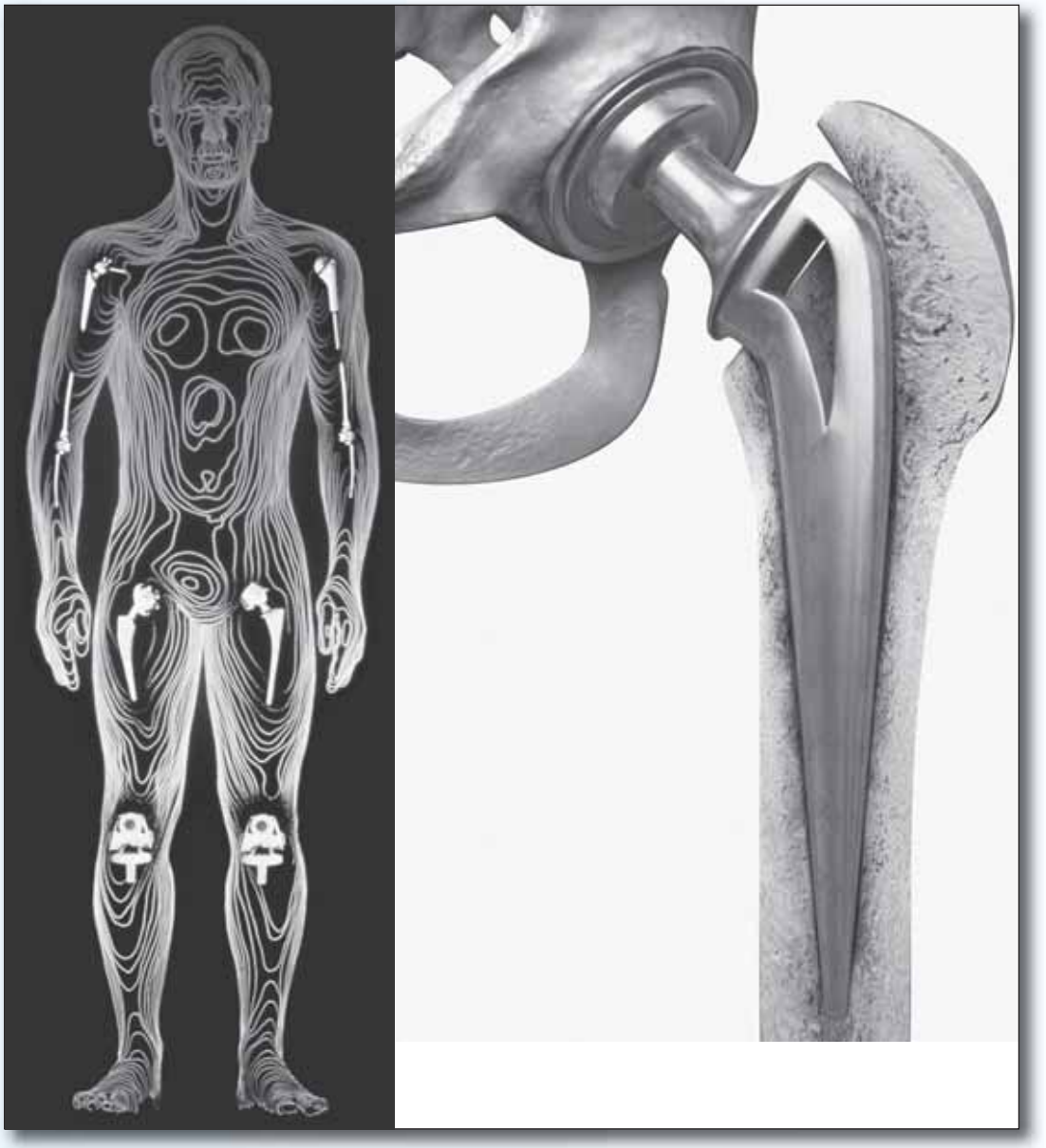
Problemas Knovel[MR]

K13-1 Encuentre el diagrama de tiempo-temperatura-transformación (TTT) del acero 1340. Suponga que el acero se mantiene a 720°C durante 1 hora, se templa a 425°C, se mantiene durante 1000 s a esta temperatura y luego se enfría al aire a temperatura ambiente.

a) ¿Cuál es la microestructura y dureza del acero después del tratamiento térmico?

b) ¿Cuáles son las designaciones, templabilidad y aplicaciones de este acero?

c) ¿Cuáles son las propiedades mecánicas de este acero entregado como laminado en caliente, normalizado y recocido cuando se revino a 425°C y fue templado en aceite?



Cada día se incorporan más implantes artificiales en el cuerpo humano. En el diagrama de la izquierda se ilustra un ejemplo de articulaciones que por lo general son reemplazadas (*PhotoLink/Photodisc Green/Getty Images*). Cada año, aproximadamente 500,000 personas reciben un implante de cadera como el que se ilustra en la fotografía de la derecha (© *MedicalRF.com/Alamy*). El implante debe estar hecho de un material biocompatible que tenga una gran resistencia a la fractura y una excelente vida a la fatiga, debe ser resistente a la corrosión y poseer una rigidez similar a la del hueso. Con frecuencia, las aleaciones no ferrosas basadas en titanio se usan para esta aplicación, al igual que las aleaciones de cobalto-cromo.

CAPÍTULO

14

Aleaciones no ferrosas

Se ha preguntado alguna vez:

- *En la historia de la humanidad, ¿qué se descubrió primero: el cobre o el acero?*
- *¿Por qué la estatua de la libertad tiene una pátina verde?*
- *¿Qué materiales se usan para fabricar implantes biomédicos para prótesis de cadera?*
- *¿Por qué son tóxicos algunos metales?*
- *¿Qué materiales se usan como "catalizadores" en el convertidor catalítico de un automóvil? ¿Qué es lo que convierten?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Reconocer y explicar las clasificaciones de las diferentes aleaciones de metales no ferrosos.
- Identificar los usos comunes de los metales y aleaciones no ferrosas.
- Identificar las propiedades materiales más comunes de los metales y aleaciones no ferrosas.

Las aleaciones no ferrosas (es decir, aleaciones de elementos que no contienen hierro) incluyen, pero no se limitan, a las aleaciones basadas en aluminio, cobre, níquel, cobalto, zinc, metales preciosos (como Pt, Au, Ag, Pd) y otros metales (por ejemplo Nb, Ta, W). En este capítulo, se exploran brevemente las propiedades y aplicaciones de aleaciones de Cu, Al y Ti en aplicaciones para soportar cargas. No se estudiarán las aplicaciones electrónicas, magnéticas y otras de aleaciones no ferrosas.

En numerosas aplicaciones, el peso es un factor de importancia crucial. Para relacionar la resistencia del material con su peso, se define una **resistencia específica**, o relación entre resistencia y peso:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\text{resistencia}}{\text{densidad}} \qquad (14\text{-}1)$$

Tabla 14-1 Resistencia específica y costo de aleaciones no ferrosas, aceros y compuestos de polímeros

Metal	Densidad (kg/m^3)	Densidad ($lb/pulg^3$)	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia específica (m)	Costo por kg (dólares)
Aluminio	2700	(0.098)	573	2.2×10^4	1.76
Berilio	1850	(0.067)	379	2.08×10^4	937
Cobre	8930	(0.322)	1030	1.2×10^4	7.05
Plomo	11360	(0.410)	69	508	2.20
Magnesio	1740	(0.063)	379	2.2×10^4	6.06
Níquel	8900	(0.321)	1241	1.4×10^4	17.65
Titanio	4510	(0.163)	1103	2.5×10^4	17.65
Tungsteno	19250	(0.695)	1030	5.6×10^3	52.90
Zinc	7130	(0.257)	517	7.4×10^3	2.10
Aceros	~7870	(0.284)	1380	1.8×10^4	0.65
(Kevlar, fracción de volumen de fibras 0.6, tensión longitudinal)	1400	(0.05)	1380	1.02×10^4	—
Aramida/epóxico (Kevlar, fracción de volumen de fibras 0.6, tensión transversal)[a]	1400	(0.05)	30	220	—
Vidrio/epóxico (fracción de volumen de fibras de vidrio E-0.6, tensión longitudinal)	2100	(0.075)	1030	5.1×10^4	—
Vidrio/epóxico (fracción de volumen de fibras de vidrio E-0.6, tensión transversal)	2100	(0.075)	48	2360	—

Datos sobre compuestos de Harper, C.A., Handbook of Materials Product Design, *3a. ed., 2001: McGraw-Hill.*

La tabla 14-1 compara la resistencia específica del acero, algunas aleaciones no ferrosas de alta resistencia y compuestos con matriz de polímeros. Otro factor que se debe considerar en el diseño de metales no ferrosos es su precio, que también varía de forma considerable. La tabla presenta los precios aproximados de diferentes materiales, pero hay que observar que los precios fluctúan impulsados por las tendencias económicas globales y que sólo son una pequeña parte del costo total de una pieza. La fabricación y el acabado, por no decir su distribución y venta, a veces contribuyen mucho más a su costo total. Los compuestos a base de carbono y otras fibras tienen también ventajas considerables respecto a su resistencia específica. Sus propiedades son por lo general anisótropas, pero la temperatura a la que se pueden emplear es limitada. En la práctica, para superar la anisotropía, es frecuente que se fabriquen compuestos en muchas capas; las direcciones de fibras se cambian en diferentes capas para reducir al mínimo la anisotropía que podría alterar las propiedades. Los compuestos se analizarán en el capítulo 17.

14-1 Aleaciones de aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la naturaleza (después del oxígeno y el silicio), pero hasta fines del siglo XIX era caro y difícil de producir. El remate de seis libras de peso instalado en lo alto del monumento a Washington en 1884 fue una de las piezas de aluminio más grandes hechas en aquel tiempo.

Propiedades y usos generales del aluminio

El aluminio tiene una densidad de 2700 kg/m^3, es decir, un tercio de la densidad del acero, y un módulo de elasticidad de 10×10^6 psi (70 GPa). Aun cuando las aleaciones de aluminio tienen propiedades relativas a la tensión más bajas que el acero, su resistencia específica (o relación entre resistencia y peso) es excelente. Por esta razón los hermanos Wright usaron una aleación de Al-Cu para fabricar su motor (capítulo

12). Al aluminio se le puede dar forma con toda facilidad, tiene alta conductividad térmica y eléctrica y no muestra transición de dúctil a frágil a bajas temperaturas. No es tóxico y puede ser reciclado con sólo alrededor de 5% de la energía que fue necesaria para hacerlo a partir de la alúmina. Esta es la razón por la cual el reciclaje de aluminio es tan exitoso. Sus útiles propiedades físicas incluyen comportamiento no ferromagnético y resistencia a la oxidación y la corrosión. Además, no muestra un verdadero límite de resistencia a la fatiga, pero una falla por fatiga puede ocurrir finalmente, incluso a esfuerzos pequeños. Debido a su baja temperatura de fusión, el aluminio no opera bien a altas temperaturas. Por último, las aleaciones que lo incluyen tienen baja dureza, lo cual genera escasa resistencia al desgaste. Además, responde con facilidad a mecanismos de endurecimiento. La tabla 14-2 compara la resistencia del aluminio puro recocido con la de aleaciones endurecidas por medio de diversas técnicas; las aleaciones pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

Alrededor de 25% del aluminio que se produce en la actualidad se usa en la industria del transporte, otro 25% en la manufactura de latas de bebidas refrescantes y otros envases, alrededor de 15% en la construcción, 15% en aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones. En 2010 se usaron alrededor de 90 kg de aluminio en un automóvil promedio fabricado en Estados Unidos. Este elemento reacciona con el oxígeno, incluso a temperatura ambiente, para producir una capa extremadamente delgada de óxido de aluminio que protege el metal base contra numerosos ambientes corrosivos (capítulo 23). Este fenómeno es contrario a la creencia común de que el Al no se oxida, ya que sí lo hace, pero el óxido que produce es altamente adherente por lo que se sella en la superficie e impide la corrosión futura, aunque se debe tener cuidado de no generalizar este comportamiento. Por ejemplo, el polvo de aluminio (debido a su elevada área superficial), cuando está presente en forma de un oxidante como el perclorato de amonio y óxido de hierro como catalizadores, sirve como combustible sólido para motores impulsores de cohetes. Estos impulsores usan ~90 toneladas de polvo atomizado de aluminio cada vez que el transbordador espacial despega y puede generar suficiente fuerza para que la nave alcance una velocidad de ~4,800 km por hora. Nuevos perfeccionamientos relacionados con el aluminio incluyen la invención de aleaciones que contienen un alto porcentaje de Mg para su uso en la fabricación de automóviles.

Clasificación

Las aleaciones de aluminio pueden dividirse en dos grupos principales: aleaciones forjadas y fundidas, categorías que dependen de su método de fabricación. Las **aleaciones forjadas**, que reciben su forma por deformación plástica, tienen composiciones y microestructuras considerablemente diferentes de las aleaciones fundidas, lo cual refleja las distintas necesidades del proceso de manufactura. Dentro de cada grupo principal es posible dividir las aleaciones en dos subgrupos: aleaciones que pueden recibir tratamiento térmico y las que no pueden ser sometidas a él.

Las aleaciones de aluminio se designan por el sistema de numeración que se muestra en la tabla 14-3. El primer número especifica los principales elementos de aleación, y los números restantes se refieren a la composición específica de la aleación.

Tabla 14-2 Efecto de los mecanismos de endurecimiento en aluminio y aleaciones que lo contienen

Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación	Relación de las resistencias entre aleaciones y metal puro
Al puro	44.8	17.3	60	1
Al comercialmente puro (por lo menos 99% puro)	89.6	34.5	45	2.0
Aleación de Al endurecida por solución sólida	110	41.4	35	2.4
Al trabajado en frío	165	152	15	8.8
Aleación de Al endurecida por dispersión	290	152	35	8.8
Aleación de Al endurecida por envejecimiento	573	503	11	29.2

Tabla 14-3 Sistema de clasificación de aleaciones de aluminio

Aleaciones forjadas:		
1xxx[a]	Al comercialmente puro (>99% Al)	No endurecible por envejecimiento
2xxx	Al-Cu y Al-Cu-Li	Endurecible por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No endurecible por envejecimiento
4xxx	Al-Si y Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento si contiene Mg
5xxx	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Endurecible por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, o B	Endurecible por envejecimiento
9xxx	No usada actualmente	
Aleaciones fundidas:		
1xx.x.[b]	Al comercialmente puro	No endurecible por envejecimiento
2xx.x.	Al-Cu	Endurecible por envejecimiento
3xx.x.	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Algunas son endurecible por envejecimiento
4xx.x.	Al-Si	No endurecible por envejecimiento
5xx.x.	Al-Mg	No endurecible por envejecimiento
7xx.x.	Al-Mg-Zn	Endurecible por envejecimiento
8xx.x.	Al-Sn	Endurecible por envejecimiento
9xx.x.	No usada actualmente	

[a]*El primer dígito muestra el elemento principal de aleación, mientras que el segundo muestra modificación; los últimos dos dígitos muestran el porcentaje decimal de la concentración de Al (p. ej., 1060 será una aleación con 99.6% de Al).*
[b]*El último dígito indica la forma del producto, 1 o 2 es lingote (depende de la pureza) y 0 para fundición.*

El grado de endurecimiento está dado por la **designación de temple** T o H, dependiendo de que la aleación reciba tratamiento térmico, es decir, endurecida por deformación (tabla 14-4). Otras designaciones indican si la aleación ha sido recocida (O), tratada por solución (W), o si se usa como está fabricada (F). Los números que siguen a la T o H indican la cantidad de endurecimiento por

Tabla 14-4 Designaciones de temple de aleaciones de aluminio

F	Como se fabricó (trabajada en caliente, forjada, fundida, etc.)
O	Recocida (en la condición más blanda posible)
H	Trabajada en frío
	H1x:sólo trabajada en frío. (La x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y endurecimiento.)
	H12: trabajo en frío que proporciona resistencia a la tensión en medio entre templados 0 y H14.
	H14: trabajo en frío que proporciona resistencia a la tensión en medio entre templados 0 y H18.
	H16: trabajo en frío que proporciona resistencia a la tensión en medio entre templados H14 y H18.
	H18: trabajo en frío que proporciona alrededor de 75% de reducción.
	H19: trabajo en frío que proporciona resistencia a la tensión mayor de 2000 psi de la obtenida por el templado H18..
	H2x: trabajada en frío y parcialmente recocida.
	H3x: trabajada en frío y estabilizada a baja temperatura para impedir endurecimiento por envejecimiento de la estructura.
W	Tratada por solución
T	Endurecido por envejecimiento
	T1: enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente.
	T2: enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente
	T3: tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.
	T4: tratada por solución y envejecida naturalmente.
	T5: enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.
	T6: tratada por solución y envejecida artificialmente.
	T7: tratada por solución y estabilizada por exceso de envejecimiento.
	T8: tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
	T9: tratada por solución, envejecida artificialmente y trabajada en frío.
	T10: enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente.

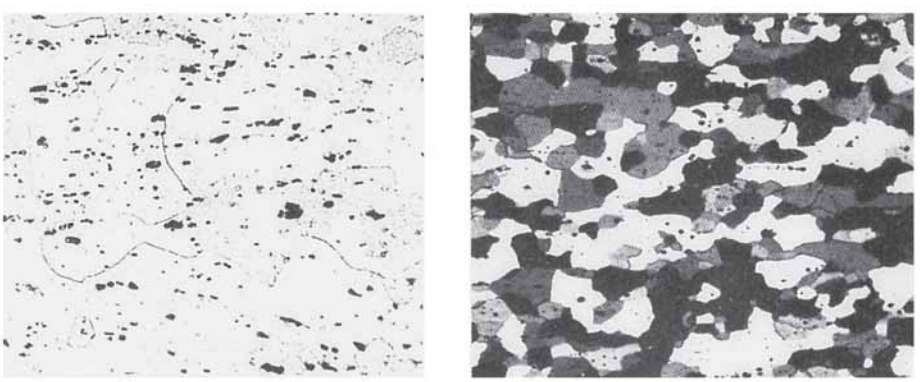
Tabla 14-5 Propiedades de aleaciones típicas de aluminio

Aleación		Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación	Aplicaciones
Aleaciones forjadas no tratables térmicamente					
1100-O	>99% Al	89.6	34.5	40	Componentes eléctricos, papel aluminio, procesamiento de alimentos, latas de bebidas refrescantes, usos arquitectónicos, metal de relleno para soldadura, tapas de latas de bebida refrescante, componentes marinos.
1100-H18		165.5	152	10	
3004-O	1.2% Mn-1.0% Mg	179.3	69	25	
3004-H18		283	248	9	
4043-O	5.2% Si	145	69	22	
4043-H18		283	269	1	
5182-O	4.5% Mg	290	131	25	
5182-H19		420	393	4	
Aleaciones forjadas tratables térmicamente					
2024-T4	4.4% Cu	469	324	20	Ruedas para camiones, fuselajes para aviones, émbolos, canoas, carros de ferrocarril y bastidores de aviones.
2090-T6	2.4% Li-2.7% Cu	552	517	6	
4032-T6	12% Si-1% Mg	379	317	9	
6061-T6	1% Mg-0.6% Si	310	276	15	
7075-T6	5.6% Zn-2.5% Mg	572	503	11	
Aleaciones fundidas					
201-T6	4.5% Cu	483	434	7	Carcazas de transmisión, piezas coladas de uso general, conexiones en aviones, carcazas de motor, motores de automóviles, equipo para manejo de alimentos, conexiones marinas.
319-F	6% Si-3.5% Cu	186	124	2	
356-T6	7% Si-0.3% Mg	228	165	3	
380-F	8.5% Si-3.5% Cu	317	159	3	
390-F	17% Si-4.5% Cu	283	241	1	
443-F	5.2% Si (colado en arena)		55	8	
	(molde permanente)	131	62	10	
	(fundido a presión)	159	110	9	
		228			

deformación, el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos especiales del procesamiento de la aleación. Las aleaciones típicas y sus propiedades están incluidas en la tabla 14-5.

Aleaciones forjadas

Las aleaciones forjadas 1xxx, 3xxx, 5xxx y casi todas las 4xxx no se pueden endurecer por envejecimiento. Las aleaciones 1xxx y 3xxx son aleaciones de una sola fase, excepto por la presencia de pequeñas cantidades de inclusiones o compuestos intermetálicos [figura 14-1*a*)]. Sus propiedades son controladas por endurecimiento por deformación, endurecimiento por



a) ***b)***

Figura 14-1 *a*) Inclusiones de $FeAl_3$ en aluminio 1100 recocido (350 ×). *b*) Precipitados de Mg_2Si en aleación de aluminio 5457 recocido (75 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminernational.org.*]

solución sólida y control del tamaño de granos. Debido a que las solubilidades de los elementos de aleación en aluminio son pequeñas a temperatura ambiente, es limitado el grado de endurecimiento por solución sólida. Las aleaciones 5xxx contienen dos fases a temperatura ambiente, es decir, α, una solución sólida de magnesio en aluminio, y Mg_2Al_3, un compuesto intermetálico duro y frágil (figura 14-2). Las aleaciones de aluminio-magnesio son endurecidas por una fina dispersión de Mg_2Al_3, así como por endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control del tamaño de granos. Como el Mg_2Al_3 no es coherente, no se pueden aplicar los tratamientos de endurecimiento por envejecimiento. La serie 4xxx también contiene dos fases, α y silicio casi puro, β (capítulo 11). Las aleaciones que contienen silicio y magnesio pueden ser endurecidas por envejecimiento si se permite que se precipite el Mg_2Si (figura 14-2*b*). Las aleaciones 2xxx, 6xxx y 7xxx pueden ser endurecidas por envejecimiento. Aun cuando estas aleaciones obtienen excelentes resistencias específicas, es limitada la cantidad de precipitado que se puede formar. Además, no se pueden usar a temperaturas superiores a aproximadamente 175°C en la condición de envejecidas. La aleación 2024 es la que más se usa para fabricar aviones. También hay un renovado interés en el desarrollo de aleaciones de Al-Li endurecidas por precipitación debido a su alto módulo de Young y baja densidad; no obstante, los altos costos de procesamiento, propiedades anisótropas y menor tenacidad a fracturas han resultado ser factores limitantes. Se usaron aleaciones de Al-Li (2195) para fabricar los tanques de combustible de segunda generación para transbordadores espaciales que se emplearán en el vehículo tripulado multipropósito Orión de la NASA, que se usará en misiones a la Luna y a Marte. Las aleaciones de Al-Sc y Al-Ti también son útiles en aplicaciones de alta resistencia.

Aleaciones fundidas

Muchas de las aleaciones fundidas de aluminio comunes que se ilustran en la tabla 14-5 contienen suficiente silicio para provocar la reacción eutéctica, lo que brinda a las aleaciones bajos puntos de fusión, buena fluidez y facilidad de moldeo. La **fluidez** es la capacidad del metal líquido para fluir por un molde sin solidificarse prematuramente, y la **facilidad de moldeo** se refiere a la facilidad con la que la aleación puede convertirse en una buena pieza fundida.

Las propiedades de las aleaciones de aluminio-silicio están controladas por endurecimiento por solución sólida de la matriz α de aluminio, endurecimiento por dispersión por la fase β, y solidificación, que controla el tamaño primario del grano, así como la naturaleza del microconstituyente eutéctico. Un rápido enfriamiento en colada en matriz o fundición en molde permanente (capítulo 9) incrementa la resistencia pues refina el tamaño de grano y el microconstituyente

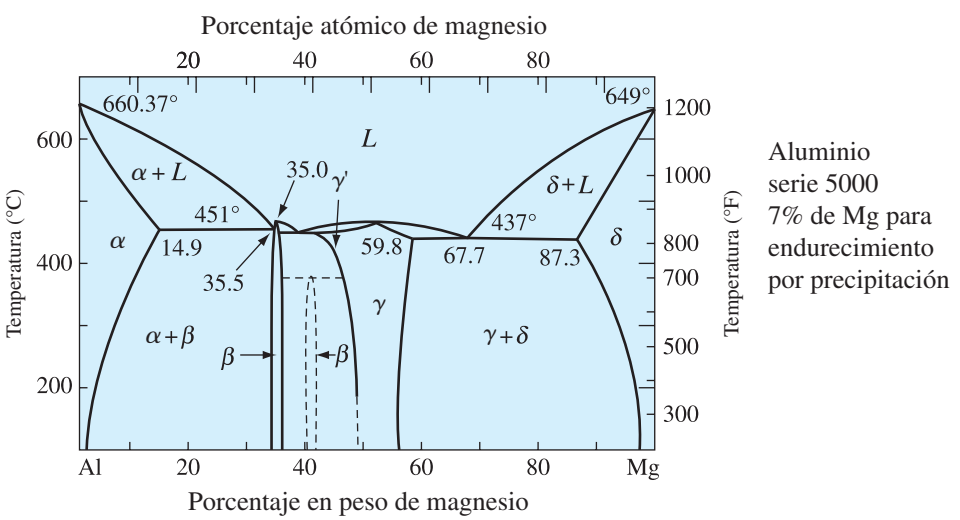
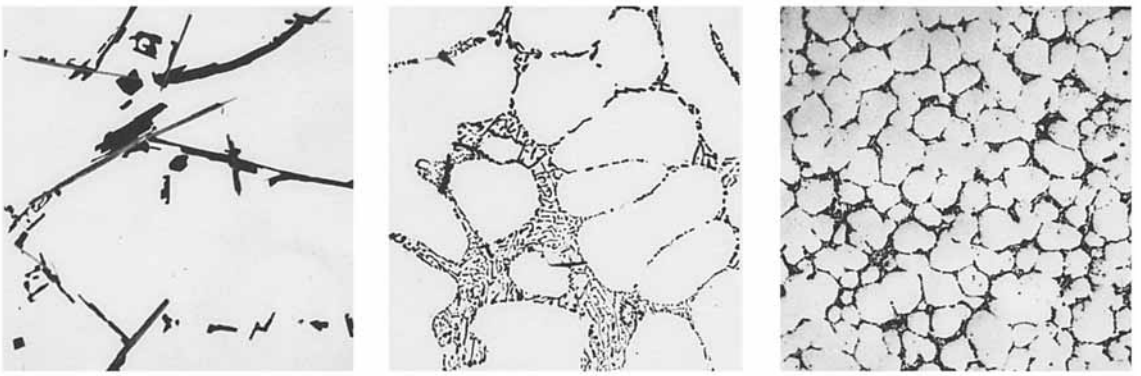


Figura 14-2 Diagrama de fases de aluminio-magnesio. Las líneas discontinuas indican límites inciertos de solubilidad. (*Basada en* American Society for Metals Handbook, *8a. ed., vol. 8, Metallography, Structures and Phase Diagrams. ASM International 1973*.)



a) *b*) *c*)

Figura 14-3 *a*) Aleación de aluminio 443 fundida en arena que contiene silicio grueso e inclusiones (350 ×). *b*) Aleación 443 en molde permanente que contiene celdas de dendrita fina y silicio fino debido a un enfriamiento más rápido (350 ×). *c*) Aleación 443 colada en matriz con una microestructura todavía más fina (350 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

eutéctico (figura 14-3). El refinamiento del grano mediante adiciones de boro y titanio, la modificación con sodio o estroncio para cambiar la estructura eutéctica, y el endurecimiento con fósforo para refinar el silicio primario (capítulo 9) son métodos comunes a los que se someten ciertas aleaciones para mejorar la microestructura y, de esta forma, el grado de endurecimiento por dispersión. Numerosas aleaciones también contienen cobre, magnesio o zinc, lo que permite el endurecimiento por envejecimiento. Los siguientes ejemplos ilustran aplicaciones de aleaciones de aluminio.

Ejemplo 14-1 *Relación entre resistencia y peso en el diseño*

Un cable de acero de 12.7 mm de diámetro tiene una resistencia a la fluencia de 482.6 MPa. La densidad del acero es de aproximadamente 7870 kg/m^3. Con base en los datos de la tabla 14-5, determine *a*) la máxima carga que el cable de acero puede soportar sin que fluya, *b*) el diámetro de una aleación de aluminio-manganeso trabajada en frío (3004-H18) que se requiere para sostener la misma carga que el acero y *c*) el peso por pie del cable de acero contra el cable de aleación de aluminio.

SOLUCIÓN

a) La carga máxima F que el cable de acero puede soportar sin que fluya está determinada por

$$F_{\text{acero}} = (S_y^{\text{acero}} A_0^{\text{acero}}) = 482.6 \times 10^6 \left[\frac{\pi}{4}(12.7 \times 10^{-3}\,\text{m})^2\right] = 61.13\ \text{kN}$$

donde S_y es la resistencia a la fluencia y A_0 el área interseccional inicial.

b) La resistencia a la fluencia de la aleación de aluminio es de 248.2 MPa. Entonces, el diámetro del cable de aluminio d_{Al} es

$$\frac{\pi}{4} d_{Al}^2 = \frac{F_{Al}}{S_y^{Al}} = \frac{61.13 \times 10^3}{248.2 \times 10^6} = 2.463 \times 10^{-4}\,\text{m}^2$$

$$d_{Al} = 17.71\ \text{mm}$$

c) Las densidades del acero y del aluminio son

$$\rho_{\text{acero}} = 7{,}870\ \text{kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Al}} = 2{,}700\ \text{kg/m}^3$$

Por lo tanto, el peso por metro de cable de acero W_{acero} es

$$W_{\text{acero}} = A_0^{\text{acero}}(1\text{ m})\,\rho_{\text{acero}} = \frac{\pi}{4}(0.0127)^2(1)(7870) = 1\text{ kg}$$

y el peso por metro de cable de aluminio es

$$W_{\text{Al}} = A_0^{\text{Al}}(1)\,\rho_{\text{Al}} = \frac{\pi}{4}(0.01771\text{ m})^2(1\text{ m})(2700\text{ kg/m}^3) = 0.665\text{ kg}$$

Aun cuando la resistencia a la fluencia del aluminio es menor que la del acero y el cable debe ser de mayor diámetro, el cable de aluminio pesa sólo unos dos tercios del cable de acero. Al comparar materiales, durante el diseño debe incluirse un factor de seguridad apropiado.

14-2 Aleaciones de magnesio y berilio

El magnesio, que con frecuencia se extrae electrolíticamente del cloruro de magnesio concentrado en el agua de mar, es más ligero que el aluminio, pues tiene una densidad de 1740 kg/m^3, y se funde a una temperatura ligeramente más baja que este elemento. En muchos ambientes, la resistencia del magnesio a la corrosión se aproxima a la del aluminio, pero la exposición a sales, por ejemplo las que hay cerca de un ambiente marino, le causa un rápido deterioro. A pesar de que las aleaciones de magnesio no son tan fuertes como las del aluminio, sus resistencias específicas son comparables. En consecuencia, se usan en aplicaciones aeroespaciales, maquinaria de alta velocidad y para transporte, así como en equipos para manejo de materiales. Sin embargo, el magnesio tiene un bajo módulo de elasticidad (6.5×10^6 psi o 45 GPa) y deficiente resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste. También presenta un riesgo durante su fundición y maquinado porque se combina fácilmente con el oxígeno y arde. Las tiras de magnesio pueden encenderse con facilidad en el laboratorio y el polvo de magnesio es excepcionalmente peligroso. Por último, la respuesta del magnesio a mecanismos de endurecimiento es relativamente baja.

Estructura y propiedades

El magnesio, que tiene la estructura CH, es menos dúctil que el aluminio. Sus aleaciones muestran cierta ductilidad, ya que la aleación incrementa el número de planos activos de deslizamiento. Puede resultar alguna deformación y endurecimiento por deformación a temperatura ambiente, y las aleaciones pueden deformarse con facilidad a altas temperaturas. El endurecimiento por deformación produce un efecto relativamente pequeño en el magnesio puro debido a su bajo coeficiente de endurecimiento por deformación (capítulo 8).

Al igual que en aleaciones de aluminio, la solubilidad de elementos de aleación en magnesio a temperatura ambiente es limitada, lo que provoca sólo un pequeño grado de endurecimiento por solución sólida. La solubilidad de muchos elementos de aleación aumenta con la temperatura, como se muestra en el diagrama de fases Mg-Al (figura 14-4). Por lo tanto, las aleaciones pueden ser endurecidas ya sea por endurecimiento por dispersión o por envejecimiento. Algunas aleaciones de magnesio endurecidas por este último método, como las que contienen Zr, Th, Ag o Ce, tienen buena resistencia al exceso de envejecimiento a temperaturas de hasta 300°C. Las aleaciones que contienen hasta 9% de Li tienen un peso excepcionalmente ligero. Las propiedades de aleaciones comunes de magnesio aparecen en la tabla 14-6.

Las aleaciones avanzadas de magnesio incluyen las de muy bajos niveles de impurezas y las que contienen grandes cantidades (>5%) de cerio y otros elementos de tierras raras. Estas aleaciones forman una película protectora de MgO que mejora la resistencia a la corrosión. Un proceso rápido de solidificación permite que mayores cantidades de elementos de aleación se disuelvan en el magnesio, con lo cual mejora aún más la resistencia a la corrosión. Pueden obtenerse mejoras en su resistencia, particularmente a altas temperaturas, si se introducen partículas de cerámica o fibras como el carburo de silicio en el metal.

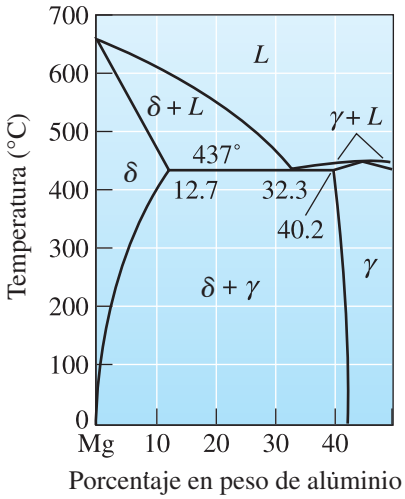


Figura 14-4 Parte del diagrama de fases del magnesio-aluminio. (*Basado en* American Society for Metals Handbook, *8a. edición, vol. 8, Metallography, Structures and Phase Diagrams, ASM International, 1973*.)

Tabla 14-6 Propiedades de aleaciones comunes de magnesio

Aleación	Composición	Resitencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación
Mg puro				
Recocido		159	90	3–15
Trabajado en frío		179	117.2	2–10
Aleaciones fundidas				
AM 100-T6	10% Al-0.1% Mn	276	152	1
AZ81A-T4	7.6% Al-0.7% Zn	276	83	15
ZK61A-T6	6% Zn-0.7% Zr	310	193	10
Aleaciones forjadas:				
AZ80A-T5	8.5% Al-0.5% Zn	379	276	7
ZK40A-T5	4% Zn-0.45% Zr	276	255	4
HK31A-H24	3% Th-0.6% Zr	262	207	8

El berilio es más ligero que el aluminio, pues tiene una densidad de 1848 kg/m^3, pero es más rígido que el acero, con un módulo de elasticidad de 42×10^6 psi (290 GPa). Las aleaciones de berilio, que muestran resistencias a la fluencia (límite elástico) de 30,000 a 50,000 psi (200-350 MPa), tienen resistencias específicas altas y la conservan, así como su rigidez, a altas temperaturas. El berilio grado instrumental se usa en sistemas de guía por inercia, donde la deformación elástica debe ser mínima; los grados estructurales se usan en partes y piezas aeroespaciales, y las aplicaciones nucleares aprovechan la transparencia del berilio a la radiación electromagnética. Los tubos de rayos X deben sellarse a la atmósfera y por lo general cuentan con una ventana de Be a través de la cual se emiten los rayos X. Desafortunadamente, el berilio es caro (tabla 14-1), frágil, reactivo y tóxico *en forma de polvo*. Su producción es bastante complicada y, por lo tanto, sus aplicaciones son muy limitadas. El óxido de berilio (BeO), que también es tóxico en forma de polvo, se usa para elaborar cerámica de alta conductividad térmica.

14-3 Aleaciones de cobre

El cobre se presenta en la naturaleza como cobre elemental y fue extraído con éxito a partir de ciertos minerales mucho antes que el hierro, ya que las necesarias temperaturas relativamente bajas para su extracción se podían obtener con más facilidad. Las menas de cobre que se encuentran en las minas

contienen otros minerales y elementos, entre los que comúnmente se encuentra el azufre. El cobre se extrae de la mena mediante un proceso de trituración y separación del que se obtiene un concentrado de cobre, que se convierte en un líquido fundido inmiscible. Durante la fundición, este fluido se combina con hierro para crear una escoria que emerge en la parte superior del contenedor, y un flujo de oxígeno convierte el azufre en gas sulfuroso que después se consume. El líquido que queda en el fondo del contenedor se conoce como mata de cobre, que contiene sulfuro de cobre y de hierro. En otro reactor, conocido como convertidor de cobre, se introduce oxígeno a la mata de cobre para convertir el sulfuro de hierro en óxido de hierro y el sulfuro de cobre en un cobre impuro que puede ser llamado **cobre en burbujas**, que luego se purifica electrolíticamente. Otros métodos para extraer cobre incluyen su lixiviación a partir de minerales con bajo contenido de azufre con un ácido débil, y luego se extrae electrolíticamente el cobre de la solución que se ha formado.

Las aleaciones con base de cobre tienen densidades más altas que los aceros. Aun cuando la resistencia a la fluencia de algunas aleaciones es alta, su resistencia específica es en general menor que la de aleaciones de aluminio o magnesio. Estas aleaciones tienen mejor resistencia a la fatiga, a la termofluencia y al desgaste que las aleaciones de peso ligero de aluminio y magnesio. Muchas de ellas tienen excelente ductilidad, resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica y térmica, y la mayoría puede fácilmente unirse o fabricarse en formas útiles. Las aplicaciones para aleaciones con base de cobre incluyen componentes eléctricos (alambre, por ejemplo), bombas, válvulas y piezas de plomería, en las que se aprovechan estas propiedades.

Las aleaciones de cobre también son poco usuales en cuanto a que se pueden seleccionar para producir un color decorativo apropiado. El cobre puro es rojo, las adiciones de zinc generan un color amarillo; y el níquel produce un color plateado. El cobre puede corroerse fácilmente para formar un sulfato de cobre básico [$CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$], un compuesto verde insoluble en agua (pero soluble en ácidos). Esta pátina o tonalidad verde proporciona un atractivo acabado a muchas aplicaciones. La Estatua de la Libertad de Estados Unidos es verde debido a la tonalidad de la cubierta de cobre oxidada que cubre la estructura de acero.

La amplia variedad de aleaciones con base de cobre aprovecha todos los mecanismos de endurecimiento que se han estudiado, cuyos efectos en las propiedades mecánicas se resumen en la tabla 14-7.

El cobre que contiene menos de 0.1% de impurezas se usa para aplicaciones eléctricas y microelectrónicas. Pequeñas cantidades de cadmio, plata y Al_2O_3 mejoran la dureza sin perjudicar la

Tabla 14-7 Propiedades de aleaciones de cobre comunes obtenidas por diferentes mecanismos de envejecimiento

Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación	Mecanismo de endurecimiento
Cu puro, recocido	209	33	60	Ninguno
Cu comercialmente puro, recocido a tamaño de grano grueso	220	70	55	Solución sólida
Cu comercialmente puro, recocido a tamaño de grano fino	234	76	55	Tamaño de grano
Cu comercialmente puro, 70% trabajado en frío	393	365	4	Endurecimiento por deformación
Cu recocido, 35% de Zn	324	103	62	Solución sólida
Cu recocido, 10% de Sn	455	193	68	Solución sólida
Cu trabajado en frío, 35% de Zn	676	434	3	Solución sólida + endurecimiento por deformación
Cu endurecido por envejecimiento, 2% de Be	1310	1210	4	Endurecimiento por envejecimiento
Cu templado y revenido, Al	760	414	5	Reacción martensítica
Bronce al manganeso fundido	490	193	30	Reacción eutectoide

conductividad. Las aleaciones de cobre de una sola fase se endurecen con trabajo en frío. Ejemplos de este efecto se muestran en la tabla 14-7. El cobre CCCa tiene excelente ductilidad y alto coeficiente de endurecimiento por deformación.

Aleaciones endurecidas por solución sólida

Varias aleaciones a base de cobre contienen grandes cantidades de elementos de aleación, pero siguen siendo de una sola fase. En la figura 14-5 se ilustran importantes diagramas de fases binarios. Las aleaciones de cobre-zinc, o **latón**, con menos de 40% de Zn forman soluciones sólidas de una fase de zinc en cobre. Las

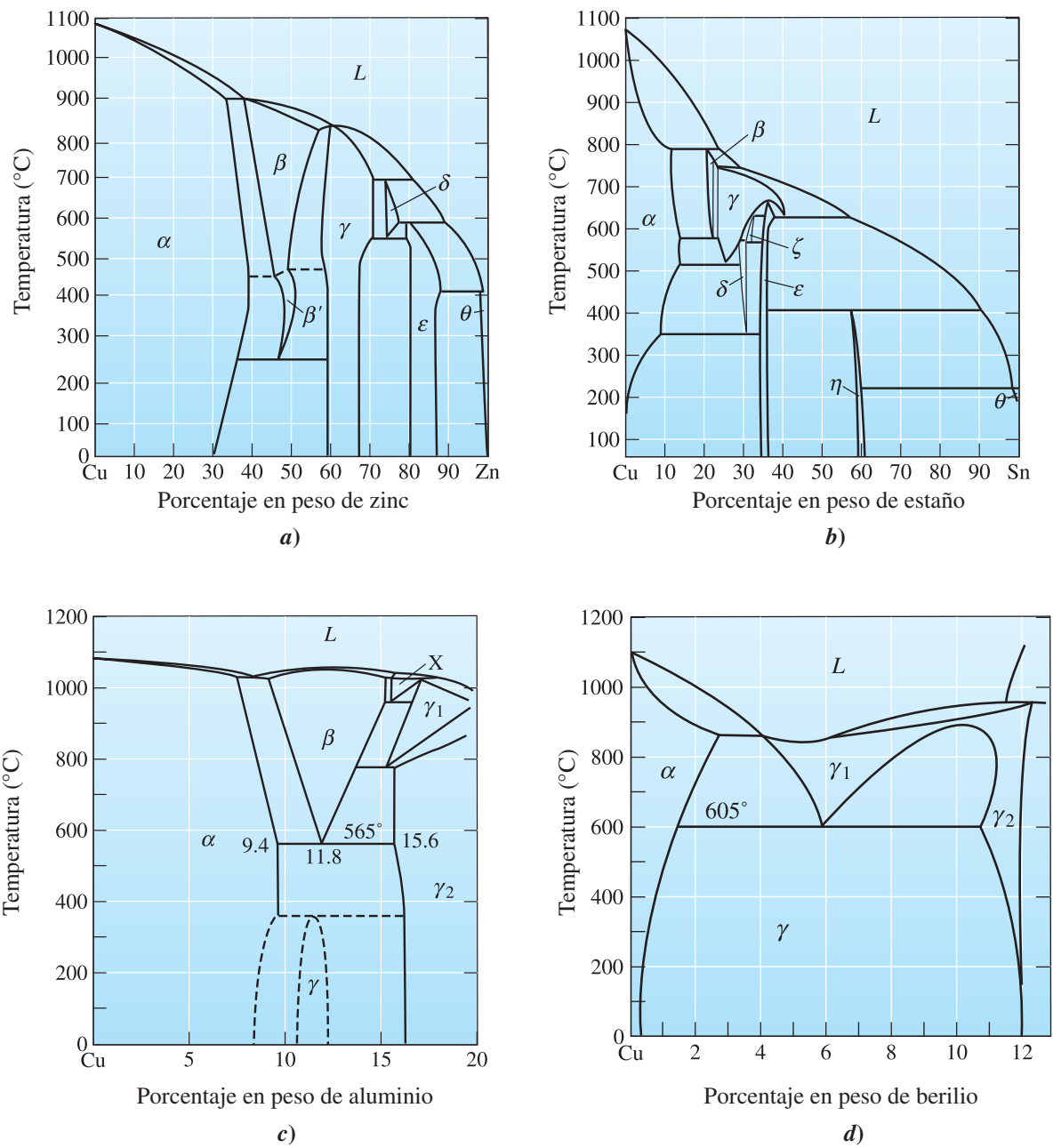


Figura 14-5 Diagramas de fases binarios de los sistemas *a*) cobre-zinc, *b*) cobre-estaño, *c*) cobre-aluminio y *d*) cobre-berilio.

propiedades mecánicas, incluso la elongación, aumentan cuando se incrementa el contenido de zinc. Estas aleaciones se pueden formar en frío en componentes más bien complicados pero resistentes a la corrosión. En general, los **bronces** son considerados como aleaciones de cobre que contienen estaño, así como, posiblemente, otros elementos. El bronce al manganeso es una aleación de resistencia muy alta que contiene manganeso y zinc para endurecimiento por solución sólida.

Los bronces al estaño, con frecuencia llamados bronces fosforados, pueden contener hasta 10% de Sn y permanecen de una sola fase. El diagrama de fases predice que la aleación contendrá el compuesto Cu_3Sn (ε); no obstante, la cinética de la reacción es tan lenta que el precipitado puede no formarse.

Las aleaciones que contienen menos de alrededor de 9% de Al o menos de 3% de Si también son de una sola fase. Estos bronces al aluminio y al silicio tienen buenas características de formación y con frecuencia son seleccionados por su buena resistencia y excelente tenacidad.

Aleaciones que se pueden endurecer por envejecimiento

Varias aleaciones con base de cobre, entre ellas zirconio-cobre, cromo-cobre y berilio-cobre, presentan una respuesta al endurecimiento por envejecimiento. Las aleaciones de cobre-berilio se usan por su alta resistencia, gran rigidez (que las hace útiles como resortes y alambres finos), y ciertas cualidades que les impiden producir chispas (lo que favorece su uso, como herramientas, cerca de gases y líquidos inflamables).

Transformaciones de fase

Los bronces al aluminio que contienen más de 9% de Al pueden formar la fase β cuando se calientan arriba de 565°C, que es la temperatura eutectoide [figura 14-5*c*)]. Debido al enfriamiento subsiguiente, la reacción eutectoide produce una estructura laminar (semejante a perlita) que contiene un compuesto γ_2 frágil. Por lo general, no ocurre la reacción peritectoide a baja temperatura, $\alpha + \gamma_2 \rightarrow \gamma$. El producto eutectoide es relativamente débil y quebradizo, pero es posible templar rápidamente la fase β para producir martensita, o β', que tiene alta resistencia y baja ductilidad. Cuando después la β' se templa, se obtiene una combinación de alta resistencia, buena ductilidad y excelente tenacidad como laminillas de α precipitadas a partir de la β'.

Aleaciones de cobre-plomo

Prácticamente cualquiera de las aleaciones forjadas puede contener hasta 4.5% de Pb. Este elemento forma una reacción monotéctica con el cobre y produce diminutas esferas de plomo como el último líquido que se solidificará. El plomo mejora las características de maquinado. Sin embargo, el uso de aleaciones de cobre-plomo tiene un importante impacto ambiental y, en consecuencia, se han ideado nuevas aleaciones sin plomo.

Ejemplo 14-2 *Diseño/Selección de materiales para un interruptor eléctrico*

Diseñe los contactos de un interruptor o relevador que abre y cierra un circuito de alta corriente eléctrica.

SOLUCIÓN

Cuando el interruptor o relevador abre y cierra, el contacto entre las superficies conductoras puede provocar desgaste y da por resultado un mal contacto y arqueo. Una alta dureza podría reducir al mínimo el desgaste, pero los materiales de contacto deben permitir que la alta corriente pase por la conexión sin sobrecalentarse ni formar arqueo.

Por lo tanto, el diseño debe proporcionar adecuadas conductividad eléctrica y resistencia al desgaste. Quizá sería ideal una aleación de cobre relativamente pura endurecida por dispersión con una fase dura que no altere la red del cobre. En una aleación de Cu-Al_2O_3, las partículas duras de óxido de cerámica proporcionarían la resistencia al desgaste, pero sin interferir con la conductividad eléctrica de la matriz de cobre.

14-4 Aleaciones de níquel y cobalto

Se usan aleaciones de níquel y cobalto para protección contra la corrosión y por su resistencia a las altas temperaturas, pues se aprovechan sus altos puntos de fusión y gran resistencia. El níquel es CCCa y tiene buena capacidad de formación; el cobalto es un metal alotrópico, con una estructura CCCa arriba de 417°C, que cambia a CH a menores temperaturas. Las aleaciones especiales de cobalto se usan por su excepcional resistencia al desgaste y, por su resistencia a fluidos del cuerpo humano, para aparatos de prótesis. Las aleaciones comunes y sus aplicaciones aparecen en la tabla 14-8.

Los polvos solidificados de superaleaciones con base en níquel y cobalto se usan para fabricar los anillos que retienen álabes de turbinas, así como para álabes de turbinas de motores de aviones. En el capítulo 12 se estudiaron las aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma basadas en Ni-Ti. El hierro, el níquel y el cobalto son ferromagnéticos. Ciertas aleaciones basadas en Fe-Ni y Fe-Co forman muy buenos materiales magnéticos. Una aleación de Ni-36% Fe (Invar) casi no sufre expansión durante su calentamiento, efecto que se aprovecha para producir materiales compuestos bimetálicos. El cobalto se usa en herramientas de corte de WC-Co.

Níquel y Monel

El níquel y sus aleaciones tienen una excelente resistencia a la corrosión y adecuadas características de formado. Cuando se agrega cobre al níquel se obtiene una resistencia máxima cercana a 60% de éste. Se usan varias aleaciones, llamadas **Monel** con aproximadamente esta composición, por su fortaleza y resistencia a la corrosión en agua salada y a altas temperaturas. Algunas de las aleaciones de Monel contienen pequeñas cantidades de aluminio y titanio. Estas aleaciones muestran una respuesta al endurecimiento por envejecimiento por la precipitación de γ', un precipitado de Ni_3Al o Ni_3Ti coherente que casi duplica las propiedades de resistencia a la tensión. Los precipitados resisten el exceso de envejecimiento a temperaturas de hasta 425°C (figura 14-6).

Superaleaciones

Las **superaleaciones** son aleaciones de níquel, hierro-níquel y de cobalto que contienen grandes cantidades de elementos de aleación destinados a producir una combinación de alta resistencia a altas temperaturas, resistencia a la termofluencia a temperaturas de hasta 1000°C, y resistencia a la corrosión. Estas excelentes propiedades a altas temperaturas se obtienen

Tabla 14-8 Composiciones, propiedades y aplicaciones de algunas aleaciones de níquel y cobalto.

Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación	Mecanismo de endurecimiento	Aplicaciones
Ni puro (99.9% Ni)	345	110	45	Recocido	Resistente a la corrosión
	655	620	4	Trabajado en frío	Resistente a la corrosión
Aleaciones de Ni-Cu					
Monel 400 (Ni-31.5% Cu)	538	270	37	Recocido	Válvulas, bombas, intercambiadores de calor
Monel K-500 (Ni-29.5% Cu-2.7% Al-0.6%)	1035	760	30	Envejecido	Ejes, resortes e impulsores
Superaleaciones de Ni					
Iconel 600 (Ni-15.5% Cr-8% Fe)	620	200	49	Carburos	Equipo de tratamiento térmico
Hastelloy B-2 (Ni-28% Mo)	896	415	61	Carburos	Resistente a la corrosión
DS-Ni (Ni-2% ThO_2)	490	330	14	Dispersión	Turbinas de gas
Superaleaciones de Fe-Ni					
Incoloy 800 (Ni-46% Fe-21% Cr)	615	283	37	Carburos	Intercambiadores de calor
Superaleaciones de Co					
Estelita 6B (60% Co-30% Cr-4.5% W)	1220	710	4	Carburos	Resistente al desgaste abrasivo

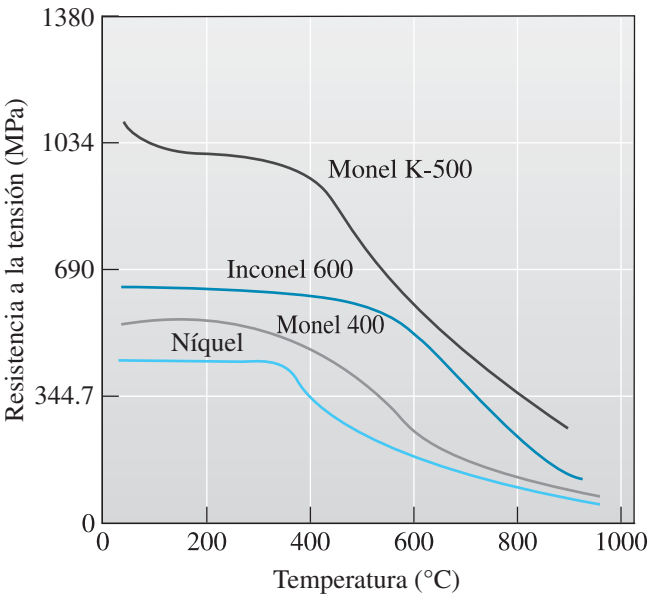


Figura 14-6 Efecto de la temperatura en la resistencia a la tensión de varias aleaciones a base de níquel.

aun cuando las temperaturas de fusión de las aleaciones sean aproximadamente iguales que las de aceros. Sus aplicaciones comunes incluyen álabes y deflectores para turbinas y motores a reacción, intercambiadores de calor, componentes de recipientes para reacciones químicas, así como equipo para tratamiento térmico.

Para obtener alta resistencia y resistencia a la termofluencia, los materiales resultantes deben tener una microestructura fuerte y estable a altas temperaturas. Por lo general se utiliza endurecimiento por solución sólida, por dispersión y por precipitación. Por ejemplo, el Inconel^{MR} 713C, es una superaleación común compuesta por Ni, Nb, Cr, Mo, Ti, Al y trazas de C, B y Zr, empleada para turbocargadores.

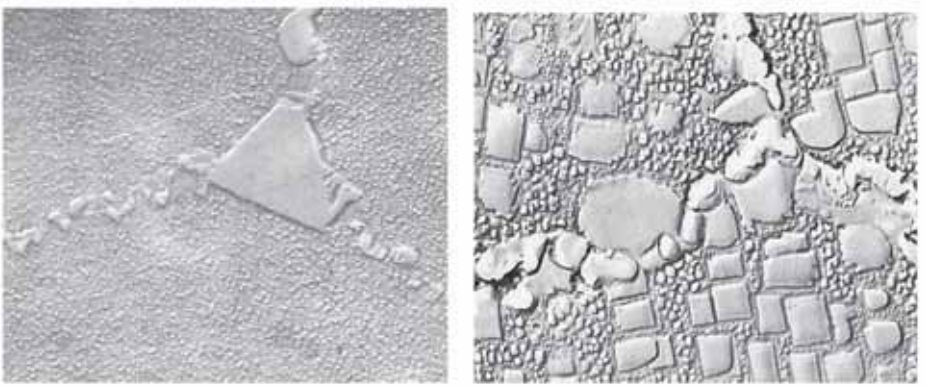
Grandes adiciones de cromo, molibdeno y tungsteno, así como pequeños agregados de tantalio, zirconio, niobio y boro, generan endurecimiento por solución sólida. Los efectos de este procedimiento son estables y, en consecuencia, otorgan a la aleación resistencia a la termofluencia, en particular cuando se usan átomos grandes como los del molibdeno y tungsteno (que se difunden lentamente).

Todas las superaleaciones contienen una pequeña cantidad de carbono que, por combinación con otros elementos, produce una red de partículas de carburo finas y estables. La red de carburo interfiere con el movimiento de dislocaciones e impide el deslizamiento de límites de granos. Los carburos incluyen TiC, BC, ZrC, TaC, Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$, Mo_6C y W_6C, aunque a veces son más complejos y contienen varios elementos de aleación. La Estelita 6B, superaleación con base de cobalto, posee una gran resistencia al desgaste a altas temperaturas debido a estos carburos.

Muchas de las superaleaciones de níquel y níquel-hierro que contienen aluminio y titanio forman el precipitado coherente γ'(Ni_3Al o Ni_3Ti) durante el envejecimiento. Las partículas γ' (figura 14-7) tienen una estructura cristalina y un parámetro de red semejante a los de la matriz de níquel; esta similitud lleva a una baja energía de superficie y minimiza el envejecimiento de las aleaciones, pues proporcionan resistencia adecuada y también buena resistencia a la termofluencia, incluso a altas temperaturas.

Si se hace variar la temperatura de envejecimiento, se pueden producir precipitados de varios tamaños. Precipitados pequeños, que se forman a bajas temperaturas de envejecimiento, pueden crecer entre los precipitados más grandes que se producen a mayores temperaturas, con lo cual aumenta el porcentaje en volumen de γ' y se incrementa todavía más la resistencia [figura 14-7*b*)].

El uso de superaleaciones de alta temperatura puede mejorar cuando se utiliza un recubrimiento de cerámica. Un método para hacerlo es cubrir primero la superaleación con una delgada capa de enlace metálico, compuesto por una compleja aleación de NiCoCrAlY, y luego aplicar un recubrimiento exterior de barrera térmica de una cerámica estabilizada de ZrO_2 (capítulo 5). El recubrimiento ayuda a reducir la oxidación de la superaleación y permite que motores a reacción operen a temperaturas más altas y con mayor eficiencia.



a) *b*)

Figura 14-7 *a*) Microestructura de una superaleación, con carburos en los límites de granos y precipitados γ' en la matriz (15,000 ×). *b*) Microestructura de una superaleación envejecida a dos temperaturas, que produce precipitados cúbicos γ' grandes y pequeños (10,000 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

Ejemplo 14-3 *Diseño/Selección de materiales para un álabe de alto rendimiento para turbina de un motor a reacción*

Diseñe una superaleación con base de níquel para producir álabes de turbina para un motor de turbina de gas para avión, que tendrá un tiempo particularmente largo de ruptura por termofluencia a temperaturas que se aproximan a 1100°C.

SOLUCIÓN

Primero, se necesita una microestructura muy estable. La adición de aluminio o titanio permite la precipitación de hasta 60% en volumen de la fase γ', durante el tratamiento térmico, y puede permitir que la aleación opere a temperaturas que se aproximan a 0.85 veces la temperatura absoluta de fusión. La adición de carbono y de elementos de aleación como tantalio y hafnio permite la precipitación de carburos de aleación que impiden que los límites de granos se deslicen a altas temperaturas. Otros elementos de aleación, entre ellos el molibdeno y el tungsteno, se endurecen por solución sólida.

En segundo término, se podría producir un álabe para turbina direccionalmente solidificado o incluso monocristalino (capítulo 9). Cuando la solidificación es direccional, se forman sólo durante ella granos columnares, lo cual elimina límites transversales de grano que podrían nuclear grietas. En un monocristal no hay límites de granos. Se podría usar el proceso de fundición por revestimiento, pero es necesario asegurar que la superaleación líquida pase por un filtro para atrapar cualesquiera diminutas inclusiones antes de que el metal entre en el molde de revestimiento cerámico.

Luego se debería proporcionar tratamiento térmico a la pieza fundida para asegurar que los carburos y el precipitado γ' tengan el tamaño y distribución correctos. Pueden usarse múltiples temperaturas de envejecimiento para asegurar que se forme el volumen más grande posible de γ'.

Por último, el álabe puede contener pequeños canales de enfriamiento en toda su extensión. El aire para la combustión en el motor puede pasar por estos canales, lo que enfriaría al álabe, antes de reaccionar con el combustible en la cámara de combustión.

14-5 Aleaciones de titanio

El titanio se produce a partir del TiO_2 por medio del proceso Kroll. El TiO_2 se convierte en $TiCl_4$ (tetracloruro de titanio, también conocido de manera informal como cosquilla), que después se reduce a metal titanio por medio de sodio o magnesio. Luego, la esponja resultante de titanio se consolida, aleada según sea necesario, y procesada por medio de fundición de arco eléctrico al vacío. El titanio proporciona una excelente resistencia a la corrosión, alta resistencia específica y buenas propiedades a altas temperaturas. Resistencias hasta de 200,000 psi (1400 MPa), junto con una densidad de 4505kg/m^3, brindan excelentes propiedades mecánicas. Una película adherente y protectora de TiO_2 otorga excelente resistencia a la corrosión y contaminación por debajo de los 535°C. Arriba de esa temperatura, la película de óxido se descompone y átomos pequeños de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno convierten al titanio en un material quebradizo.

La excelente resistencia del titanio a la corrosión permite su aplicación en equipos para procesos químicos, componentes marinos e implantes biomédicos, por ejemplo, prótesis de cadera. El titanio es un importante material aeroespacial que se usa en bastidores para aviones y componentes para motores a reacción. Cuando se combina con el niobio, se forma un compuesto intermetálico superconductor; con níquel, la aleación resultante presenta el efecto de memoria de forma; cuando se combina con aluminio, se produce una nueva clase de aleaciones intermetálicas. Las aleaciones de titanio se usan para equipo deportivo, por ejemplo, cabezas de palos de golf.

El titanio es alotrópico, y su estructura cristalina es CH (α) a bajas temperaturas y CCCu (β) arriba de 882°C. Los elementos de aleación, que generan endurecimiento por solución sólida y cambian la temperatura de transformación alotrópica, pueden dividirse en cuatro grupos (figura 14-8). Cuando se agregan materiales como estaño y zirconio proporcionan endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación. El aluminio, el oxígeno, el hidrógeno y otros elementos estabilizadores α incrementan la temperatura a la que α se transforma en β. Los estabilizadores beta, como el vanadio, el tantalio, el molibdeno y el niobio hacen disminuir la temperatura de transformación, provocando incluso que β sea estable a temperatura ambiente. Por último, el manganeso, el cromo y el hierro producen una reacción eutectoide, es decir, reducen la temperatura a la que ocurre la transformación α-β y producen una estructura de dos fases a temperatura ambiente. Varias categorías de titanio y sus aleaciones aparecen en la tabla 14-9.

Titanio comercialmente puro

El titanio no aleado se usa por su superior resistencia a la corrosión. Impurezas como el oxígeno incrementan su resistencia (figura 14-9), pero reducen sus propiedades como barrera contra la corrosión. Entre sus aplicaciones se cuentan la de intercambiadores de calor, tuberías, reactores, bombas y válvulas para las industrias química y petroquímica.

Aleaciones de titanio alfa

La más común de todas las aleaciones α contiene 5% de Al y 2.5% de Sn, que proporcionan endurecimiento por solución sólida a la α CH. Las aleaciones α son recocidas a altas temperaturas en la región β. El rápido enfriamiento da una estructura acicular de grano α, o de Widmanstätten (figura 14-10) que otorga buena resistencia a la fatiga. El enfriamiento en horno da por resultado una estructura α más semejante a placas que proporciona buena resistencia a la termofluencia.

Aleaciones de titanio beta

Aun cuando grandes adiciones de vanadio o molibdeno producen una estructura enteramente β a temperatura ambiente, ninguna de las aleaciones β en realidad son aleadas a ese grado. En cambio, son ricas en estabilizadores β, de modo que un rápido enfriamiento produce una estructura metaestable compuesta sólo por β. El endurecimiento se obtiene tanto debido a la gran cantidad de elementos de aleación de endurecimiento por solución sólida como al envejecimiento de la estructura β metaestable para permitir que α se precipite. Las aplicaciones incluyen sujetadores de alta resistencia, viguetas y otras conexiones para aplicaciones en la industria aeroespacial.

Aleaciones de titanio alfa-beta

Con un adecuado equilibrio de los estabilizadores α y β se produce una mezcla de α y β a temperatura ambiente. La aleación Ti-6% Al-4% V, un ejemplo de este método, es con mucho la más común de todas las aleaciones de titanio. Puesto que

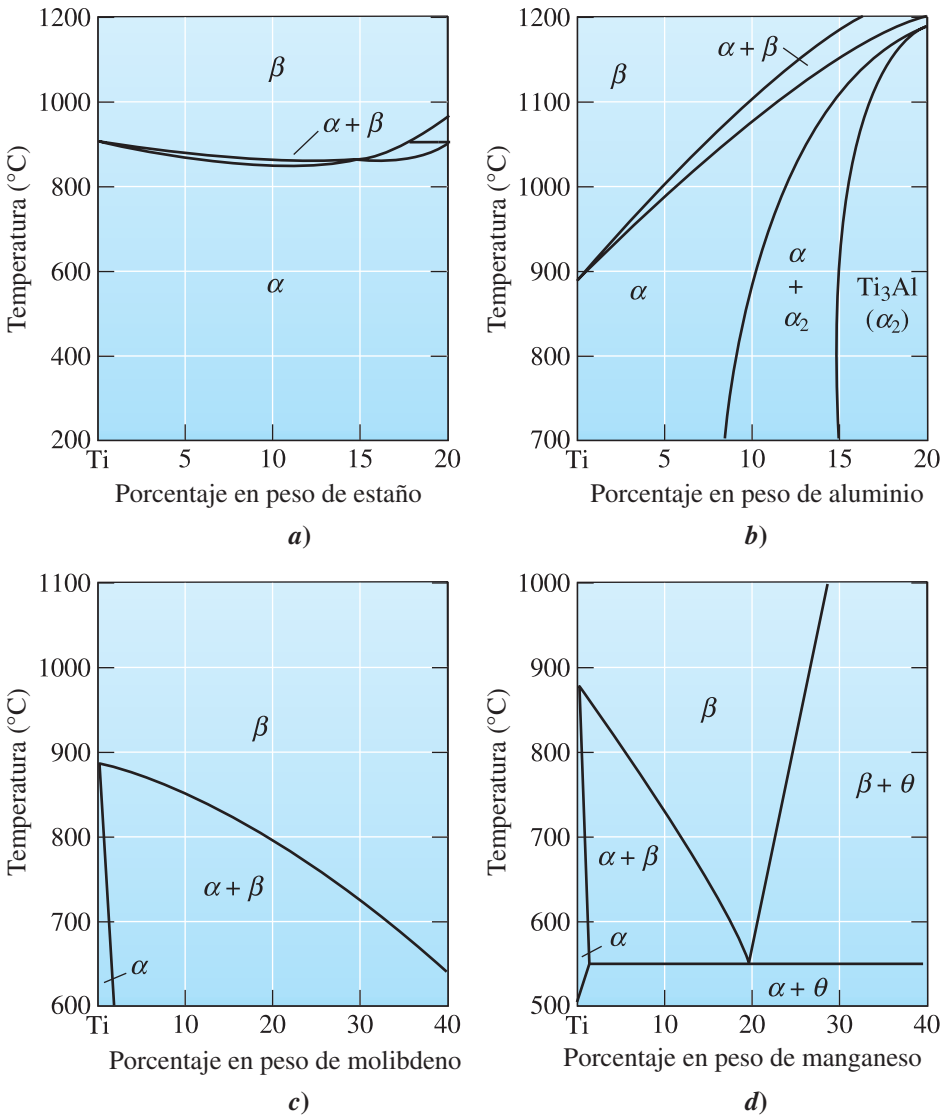


Figura 14-8 Partes de los diagramas de fases de *a*) titanio-estaño, *b*) titanio-aluminio, *c*) titanio-molibdeno y *d*) titanio-manganeso.

Tabla 14-9 Propiedades de algunas aleaciones de titanio

Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación
Ti comercialmente puro:			
99.5% Ti	241	172	24
99.0% Ti	552	483	15
Aleaciones Ti alfa:			
5% Al-2.5% Sn	862	780	15
Aleaciones Ti beta:			
13% V-11% Cr-3% Al	1290	1215	5
Aleaciones Ti alfa-beta			
6% Al-4% V	1035	965	8

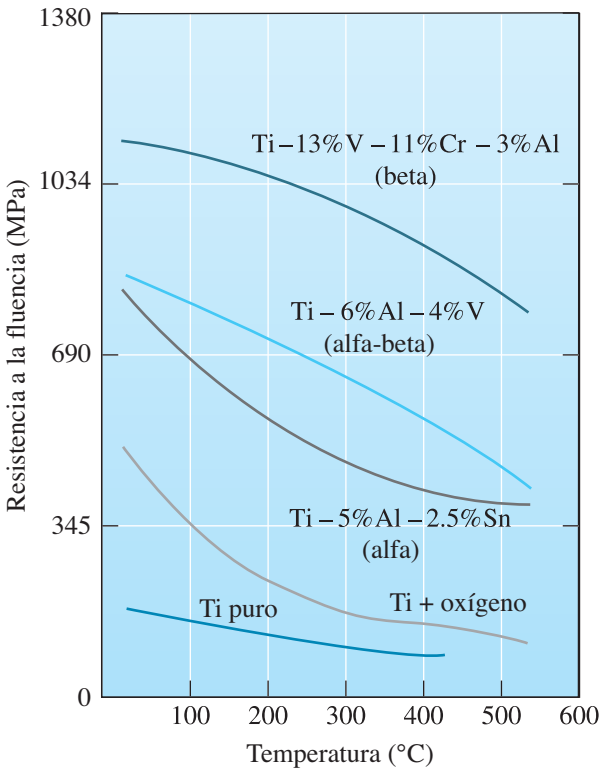
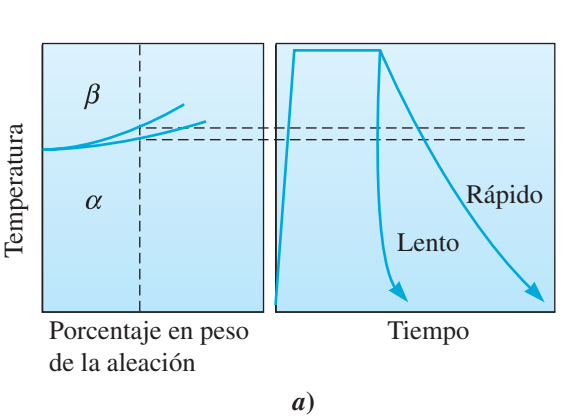
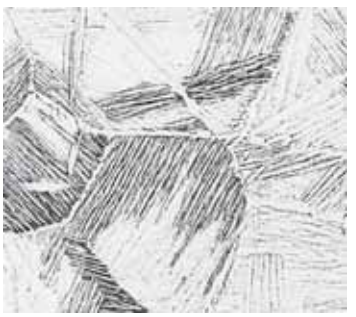


Figura 14-9 Efecto de la temperatura sobre la resistencia a la fluencia de algunas aleaciones de titanio.





a) ***b)***

Figura 14-10 *a*) Recocido y *b*) microestructura de titanio α enfriada rápidamente (100 ×). Tanto el precipitado de límites de grano y las placas Widmanstätten son α. [*De* ASM Handbook, *vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

las aleaciones contienen dos fases, se pueden usar tratamientos térmicos para controlar la microestructura y las propiedades.

El recocido proporciona una combinación de alta ductilidad, propiedades uniformes y adecuada resistencia. La aleación se calienta justo por debajo de la temperatura de transición β, lo que permite que una pequeña cantidad de α permanezca e impida el crecimiento de granos (figura 14-11*a*). Un enfriamiento lento provoca que se formen granos α equiaxiales (figura 14-11*b*); la estructura equiaxial proporciona ductilidad adecuada y facilidad de formado, al tiempo que dificulta que se formen grietas. Un enfriamiento más rápido, en particular por encima de la temperatura de transición α-β, produce una fase α acicular, o de "tejido de canasta" [figura 14-11*c*)]. Aun cuando se pueden formar grietas por fatiga con más facilidad en esta estructura, las grietas pueden seguir una tortuosa dirección a lo largo de los límites entre α y β. Esta condición genera un lento crecimiento de grietas por fatiga, adecuadas tenacidad a fracturas y resistencia a la termofluencia.

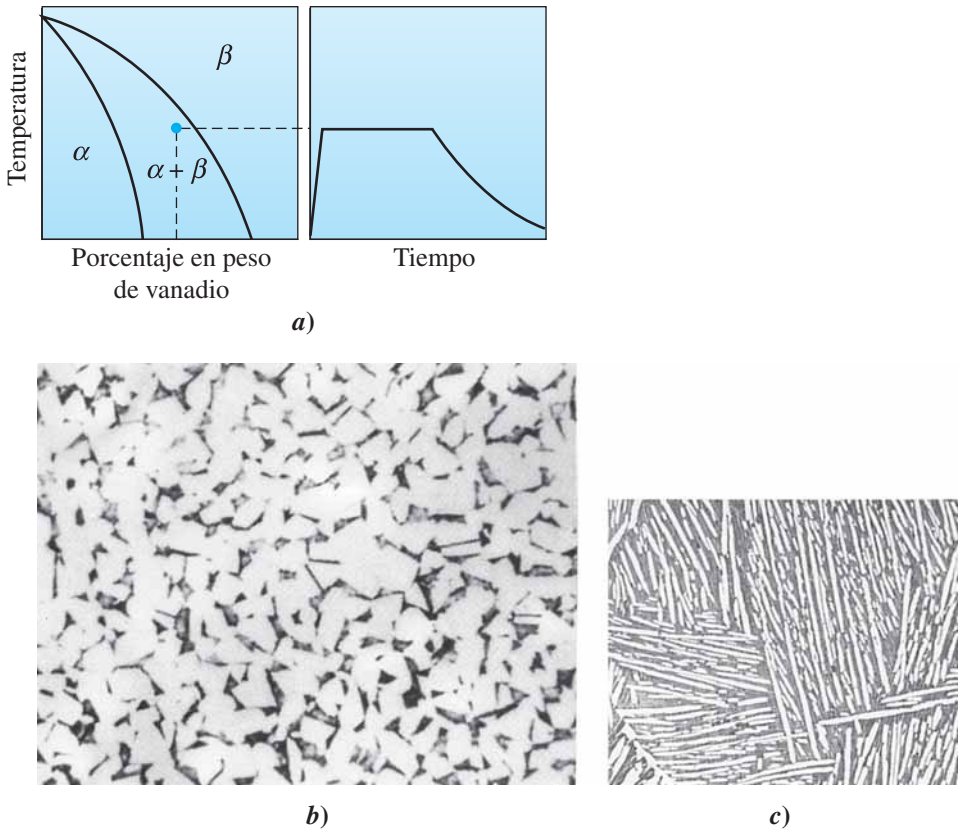


Figura 14-11 Recocido de una aleación de titanio α-β. *a*) El recocido se realiza apenas debajo de la temperatura de transformación α-β. *b*) Un enfriamiento lento da granos α equiaxiales [(250 ×) y *c*) un enfriamiento rápido da granos α aciculares (2500 ×). [De ASM Handbook, vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminernational.org.]

Se pueden producir dos posibles microestructuras cuando la fase β se templa a partir de una alta temperatura. El diagrama de fases de la figura 14-12 incluye una línea discontinua de inicio de martensita, que aporta la base para un tratamiento de templado y revenido. La β se transforma en martensita de titanio (α') en una aleación que cruza la línea *Ms* cuando se enfría. La martensita de titanio es una fase supersaturada relativamente blanda. Cuando se recalienta α', el revenido ocurre por la precipitación de β a partir de la α' supersaturada:

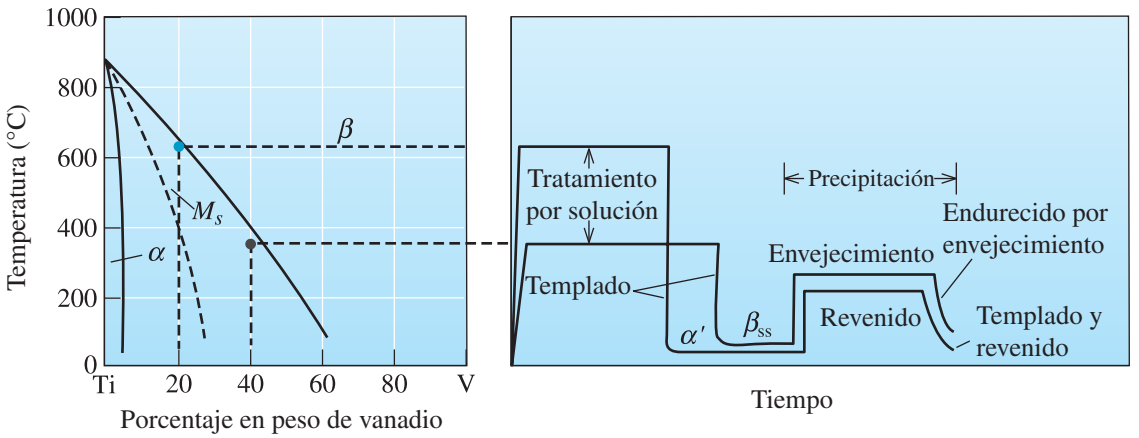
$$\alpha' \rightarrow \alpha + \text{precipitados } \beta \tag{14-2}$$

Al principio, los precipitados β finos incrementan la resistencia en comparación con los α', contrario a lo que ocurre cuando se templa martensita de acero; no obstante, ocurre un ablandamiento cuando se realiza el templado a una temperatura demasiado alta.

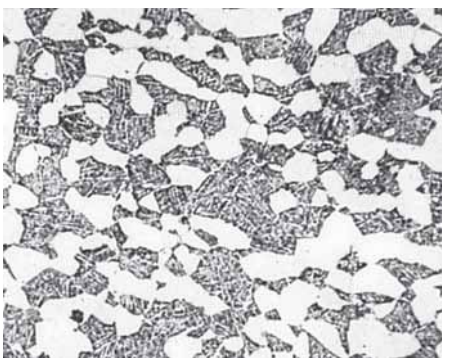
Las composiciones α-β más altamente aleadas son endurecidas por envejecimiento. Cuando la β de estas aleaciones se templa, β_{ss}, que está sobresaturada en titanio, permanece. Cuando la β_{ss} es envejecida, α se precipita en una estructura Widmanstätten (figura 14-12):

$$\beta_{ss} \rightarrow \beta + \text{precipitados } \alpha \tag{14-3}$$

La formación de esta estructura genera una mejor resistencia y tenacidad a fracturas. Los componentes de aviones, cohetes, motores a reacción y trenes de aterrizaje son aplicaciones típicas de las aleaciones α-β con tratamiento térmico. Algunas aleaciones, entre ellas la Ti-6% Al-4% V, son superplásticas y pueden deformarse hasta 100%. Esta aleación también se emplea para elaborar implantes para el cuerpo humano. Las aleaciones de titanio son consideradas **biocompatibles** (es decir, no son rechazadas por el organismo). Luego del perfeccionamiento de recubrimientos porosos de composiciones de cerámica semejantes al hueso, conocidas como hidroxiapatita, es posible hacer



a)



b)

Figura 14-12 *a*) Tratamiento térmico y *b*) microestructura de las aleaciones de titanio α-β. La estructura contiene α primaria (granos blancos grandes) y una matriz β oscura con agujas de α formadas durante el envejecimiento (250 ×). [*De* ASM Handbook, *vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.]

implantes de titanio **bioactivos** (es decir, el hueso natural puede crecer en el recubrimiento de hidroxiapatita). Los siguientes tres ejemplos ilustran aplicaciones de aleaciones de titanio.

Ejemplo 14-4 *Diseño de un intercambiador de calor*

Diseñe un intercambiador de calor de 1.5 m de diámetro, 9.15 m de largo, para la industria petroquímica (figura 14-13).

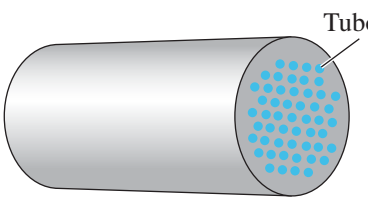


Figura 14-13 Bosquejo de un intercambiador de calor con tubos de titanio (ejemplo 14-4).

SOLUCIÓN

El intercambiador de calor debe satisfacer varios criterios de diseño. Debe tener resistencia adecuada a la corrosión para manejar productos agresivos de la refinación química; operar a temperaturas relativamente altas; formarse fácilmente en láminas y tubos de los cuales se fabricará el intercambiador de calor; y, asimismo, debe tener buenas facilidades para soldarse para unir los tubos al cuerpo del intercambiador de calor.

Siempre que la máxima temperatura de operación sea menor de 535°C para que la película de óxido sea estable, el titanio podría ser una buena opción para brindar resistencia a la corrosión a temperaturas altas. Un titanio comercialmente puro brinda la mejor resistencia a la corrosión.

El titanio puro también proporciona una superior característica de formado y de soldadura y, por lo tanto, sería la elección más lógica. Si el titanio puro no asegura suficiente resistencia, una alternativa es una aleación de titanio α, que todavía proporciona adecuada resistencia a la corrosión, características de formado y facilidad para soldadura, pero también una resistencia un poco mejor.

Ejemplo 14-5 *Diseño de una biela*

Diseñe una biela de alto rendimiento para el motor de un automóvil de carreras (figura 14-14).

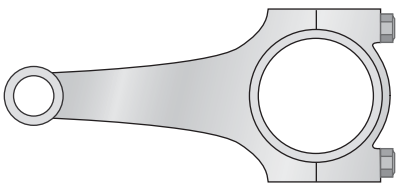


Figura 14-14 Bosquejo de una biela (ejemplo 14-5).

SOLUCIÓN

Un motor de alto rendimiento para competencias exige materiales que puedan operar a temperaturas y esfuerzos altos, que al mismo tiempo deben minimizar el peso del motor. En automóviles convencionales, en ocasiones las bielas son de acero forjado o de un hierro fundido maleable. Se podría ahorrar un peso considerable si se sustituyen estos materiales por titanio.

Para alcanzar altas resistencias se podría considerar una aleación de titanio α-β. Debido a su disponibilidad, la aleación Ti-6% Al-4% V es una buena opción. La aleación se calienta a unos 1065°C, que está en la parte totalmente β del diagrama de fases. Durante el proceso de templado se forma martensita de titanio; subsecuentes revenidos producen una microestructura que contiene precipitados β en una matriz α.

Cuando el tratamiento térmico se realiza en la región totalmente β, la martensita revenida tiene una estructura acicular, que reduce la rapidez de crecimiento de cualesquiera grietas por fatiga que pudieran formarse.

Ejemplo 14-6 *Materiales para prótesis de cadera*

¿Qué tipo de material escogería usted para un implante total de cadera?

SOLUCIÓN

Una prótesis de cadera está destinada a sustituir parte del hueso fémur desgastado o dañado. El implante tiene una cabeza de metal y se ajusta en la cavidad del fémur. Es necesario considerar los siguientes factores: biocompatibilidad, resistencia a la corrosión, alta resistencia a la fractura, excelente vida de fatiga (para que los implantes duren muchos años, puesto que es difícil realizar la cirugía conforme los pacientes envejecen) y resistencia al desgaste. También es necesario considerar la rigidez. Si la aleación seleccionada es demasiado rígida en comparación con el hueso, casi toda la carga se trasladará al implante, lo que provocaría el debilitamiento del resto del hueso y, a su vez, puede hacer que el implante se afloje. En consecuencia, se requiere un material con una alta resistencia a la tensión, resistencia a la corrosión, biocompatibilidad y resistencia a fracturas. Estos requerimientos sugieren un acero inoxidable 316 o Ti-6% Al- 4% V. Ninguno de estos materiales es ferromagnético y ambos son opacos a los rayos X, lo que permite tomar imágenes

de resonancia magnética y usar rayos X. Las aleaciones de titano no son muy duras y pueden desgastarse. Los aceros inoxidables son más duros, pero mucho más rígidos que el hueso. El titanio es biocompatible y sería una mejor opción. Quizás un material compuesto en el que el vástago se elabore con una aleación Ti-6% Al-4% V y la cabeza con una cerámica resistente al desgaste y a la corrosión y relativamente tenaz, como la alúmina, puede ser la respuesta. El interior de la concavidad podría elaborarse de un polietileno de densidad ultraalta (de peso molecular ultraalto) que tenga un coeficiente de fricción muy bajo. La superficie del implante podría hacerse porosa para estimular al hueso a que crezca. Otra opción es recubrir el implante con un material como hidroxiapatita porosa para estimular el crecimiento del hueso.

14-6 Metales refractarios y preciosos

Los **metales refractarios**, que incluyen tungsteno, molibdeno, tantalio y niobio (o columbio), tienen temperaturas de fusión excepcionalmente altas (arriba de 1925°C) y, en consecuencia, potencial para usarse a alta temperatura. Las aplicaciones van desde filamentos para bombillas eléctricas, toberas para cohetes, generadores de energía eléctrica nucleares, capacitores electrónicos con base de tantalio y niobio, hasta equipo de procesamiento químico. No obstante, los metales tienen una alta densidad, lo cual limita sus resistencias específicas (tabla 14-10).

Oxidación

Los metales refractarios comienzan a oxidarse entre 200 y 425°C y son rápidamente contaminados o se vuelven frágiles. En consecuencia, se requiere tomar precauciones especiales durante su fundición, trabajo en caliente, soldadura o metalurgia de polvos. Estos metales deben también ser protegidos durante el servicio a altas temperaturas. Por ejemplo, el filamento de tungsteno de una bombilla eléctrica está protegido por el vacío.

En algunas aplicaciones los metales pueden estar recubiertos con una capa de siliciuro o de aluminiuro. La capa debe *a*) tener una alta temperatura de fusión, *b*) ser compatible con el metal refractario, *c*) proporcionar una barrera de difusión para evitar que lleguen contaminantes a la capa base y *d*) tener un coeficiente de expansión térmica similar a la del metal refractario. Existen recubrimientos que protegen el metal hasta unos 1650°C. En algunas aplicaciones, por ejemplo en capacitores para teléfonos celulares, la formación de óxido es útil, dado que se lo usa como material no conductor.

Características de formado

Los metales refractarios, que tienen la estructura cristalina CCCu, presentan una temperatura de transición de dúctil a quebradiza. Debido a que las temperaturas de transición del niobio y del tantalio están por debajo de la temperatura ambiente, estos dos metales se pueden formar con facilidad. Sin embargo, por lo general el molibdeno y el tungsteno recocidos tienen una temperatura de transición por arriba de la temperatura ambiente, característica que los vuelve quebradizos. Por fortuna, si estos metales se trabajan en caliente para producir una microestructura fibrosa, la temperatura de transición se baja y se mejoran las características de formación.

Tabla 14-10 Propiedades de algunos metales refractarios

			$T = 1000°C$		
Metal	**Temperatura de fusión (°C)**	**Densidad (kg/m³)**	**Resistencia a la tensión (MPa)**	**Resistencia a la fluencia (MPa)**	**Temperatura de transición (°C)**
Nb	2468	8570	117	55	−140
Mo	2610	10220	345	207	30
Ta	2996	16600	186	165	−270
W	3410	19250	455	103	300

Aleaciones Por medio de aleaciones se obtienen grandes incrementos de las propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a alta temperatura. El tungsteno aleado con hafnio, renio y carbono puede operar hasta a 2,100°C. Por lo general, estas aleaciones son endurecidas por solución sólida; en realidad, el tungsteno y el molibdeno forman una serie completa de soluciones sólidas, en forma muy parecida al cobre y al níquel. Algunas aleaciones, como el W-2% ThO_2, son endurecidas por dispersión por partículas de óxido durante su manufactura por medio de procesos de polvos metalúrgicos. Por lo general, las puntas de soldadura están hechas de W-2% ThO_2. Los materiales compuestos, como el niobio reforzado con fibras de tungsteno, pueden también mejorar las propiedades a altas temperaturas.

Metales preciosos Éstos incluyen al oro, la plata, el paladio, el platino y el rodio. Como su nombre lo indica, son preciosos y caros. Desde el punto de vista de la ingeniería, estos materiales resisten la corrosión y son muy buenos conductores de electricidad. Como consecuencia de ello, con frecuencia sus aleaciones se usan como electrodos para dispositivos. Estos electrodos se forman usando la deposición de películas delgadas (por ejemplo chisporroteo o galvanoplastia) o impresión por serigrafía de dispersiones/pastas de polvo de metal. Nanopartículas de Pt/Rh/Pd (cargadas en un soporte cerámico) también se usan como catalizadores en automóviles. Estos metales facilitan la oxidación del CO en CO_2 y del NO_x en N_2 y O_2. También se usan como catalizadores para refinar petróleo.

Resumen

- Los "metales ligeros" incluyen aleaciones de baja densidad con base de aluminio, magnesio y berilio. Las aleaciones de aluminio tienen alta resistencia específica debido a su baja densidad y, como resultado de ello, encuentran muchas aplicaciones en la industria aeroespacial. Excelente resistencia a la corrosión y buena conductividad eléctrica del aluminio también contribuyen a un vasto número de aplicaciones. A bajas temperaturas se reducen los usos del aluminio y del magnesio debido a la pérdida de sus propiedades mecánicas como resultado de exceso de envejecimiento o recristalización. Las aleaciones de cobre (latones y bronces) también se usan en numerosas aplicaciones estructurales y de otros tipos. Las aleaciones de titanio tienen densidades y resistencia a la temperatura intermedias, junto con una excelente resistencia a la corrosión, lo que permite usarlas en la industria aeroespacial, procesos químicos y aparatos biomédicos.
- Las aleaciones de níquel y cobalto, lo que incluye las superaleaciones, presentan buenas propiedades a temperaturas incluso más altas. Combinadas con su buena resistencia a la corrosión, estas aleaciones encuentran numerosas aplicaciones en motores para aviones y equipo para procesos químicos.

Glosario

Aleación no ferrosa Aleación basada en algún metal que no es hierro.

Aleaciones forjadas Aleaciones a las que se da forma mediante un proceso de deformación.

Bioactivo Material que no es rechazado por el cuerpo humano y a la larga se hace parte del organismo (por ejemplo hidroxiapatita).

Biocompatible Material que no es rechazado por el cuerpo humano.

Bronce Por lo general, aleaciones de cobre que contienen estaño pero pueden contener otros elementos.

Cobre ampollado Forma impura de cobre que se obtiene durante el proceso de refinación de cobre.

Designación de temple Notación breve que utiliza letras y números para describir el procesamiento de una aleación. Los temples H se refieren a aleaciones trabajadas en frío; los T se refieren a tratamientos de endurecimiento por envejecimiento.

Facilidad de moldeo Facilidad con la que un metal puede ser vaciado en un molde para elaborar una pieza fundida, sin producir defectos o requerir técnicas poco comunes o caras para evitar problemas de fundición.

Fluidez Capacidad de un metal líquido para llenar cavidades en moldes sin solidificarse prematuramente.

Latón Grupo de aleaciones con base de cobre, que normalmente contiene zinc como principal elemento de aleación.

Metales refractarios Metales que tienen una temperatura de fusión arriba de 1925°C.

Monel Aleación de cobre-níquel, que contiene aproximadamente 60% de Ni, que presenta máxima resistencia en el sistema de aleación binario.

Resistencia específica Relación entre resistencia y densidad. También llamada relación entre resistencia y peso.

Superaleaciones Grupo de aleaciones con base en níquel, hierro-níquel y cobalto que tienen excepcional resistencia al calor, resistencia a termofluencia y resistencia a la corrosión.

Problemas

14-1 En algunos casos es posible que interese más el costo por unidad de volumen que el costo por unidad de peso. Vuelva a elaborar la tabla 14-1 para mostrar el costo en términos de $/cm^3. ¿Este resultado cambia o altera la relación entre los diferentes materiales?

14-2 Determine la resistencia específica de los siguientes metales y aleaciones (use las densidades del principal componente metálico como una aproximación de la densidad de la aleación donde se requiera):

Aleación/metal	Resistencia a la tensión (MPa)
1100-H18	165
5182-O	290
2024-T4	469
2090-T6	552
201-T6	483
ZK40A-T5	276
Cu-2% Be endurecida por envejecimiento	1310
Aleación alfa Ti	862
W	455
Ta	186

Sección 14-1 Aleaciones de aluminio

14-3 ¿Cuánto costarían 50 kg de una aleación hipotética 5074-O en precios de materia prima empleando las estimaciones que se proporcionan en la tabla 14-1?

14-4 Tradicionalmente, los aceros estructurales han sido empleados en la construcción de barcos; no obstante, debido a los crecientes costos del combustible, se desea hallar materiales alternos de menor peso. Algunas de las propiedades clave que se requieren para materiales en la construcción de barcos son su alta resistencia a la fluencia, alta resistencia a la corrosión y bajo costo. Exponga los beneficios y desventajas de las aleaciones de aluminio como sustituto de los aceros estructurales en barcos.

14-5 Suponiendo que la densidad siga sin cambio, compare la resistencia específica de la aleación 2090-T6 con la de una aleación de aluminio 443-F colada en matriz. Si usted consideró la densidad real, ¿piensa que la diferencia entre las resistencias específicas aumentaría o sería menor? Explique su respuesta.

14-6 Explique por qué las aleaciones de aluminio que contienen más de alrededor de 15% de Mg no se usan.

14-7 ¿Esperaría usted que una aleación de aluminio 2024-T9 fuera más fuerte o más débil que una aleación 2024-T6? Fundamente su respuesta.

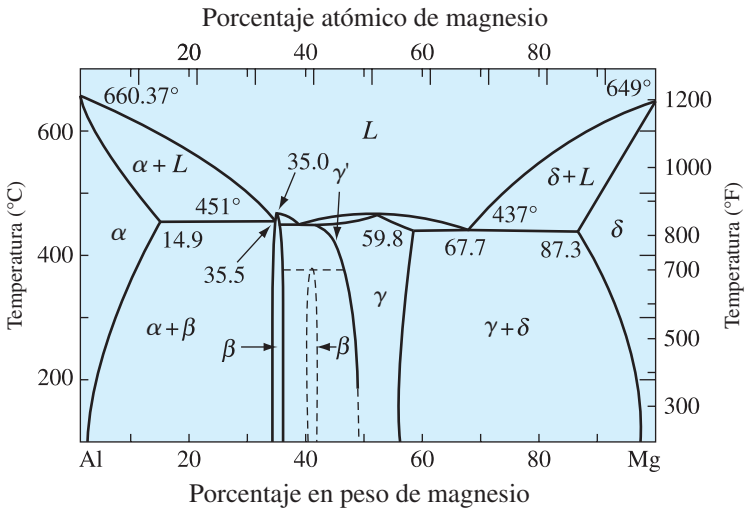
14-8 Estime la resistencia a la tensión esperada de las siguientes aleaciones de aluminio:
a) 1100-H14
b) 5182-H12
c) 3004-H16

14-9 Un cable de acero de 10 mm de diámetro, con resistencia a la fluencia de 480 MPa, debe ser reemplazado para reducir su peso total. ¿Cuál de las siguientes aleaciones de aluminio podría ser un sustituto potencial?
a) 3004-H18 (S_y = 248 MPa)
b) 1100-H18 (S_y = 151 MPa)
c) 4043-H18 (S_y = 269 MPa)
d) 5182-O (S_y = 131 MPa)
La densidad del acero que se usó para construir el cable fue de 7,870 kg/m^3, y suponga que la densidad de todas las aleaciones de aluminio citadas antes es de 2,700 kg/m^3.

14-10 Suponga que, por rápida solidificación desde el estado líquido, una aleación sobresaturada de Al-7% Li puede ser producida y después envejecida. Compare la cantidad de β que se formará en esta aleación con respecto a la que se forma en una aleación 2090.

14-11 Determine la cantidad de $Mg_2Al_3(\beta)$ que se espera se forme en una aleación de aluminio 5182-O (vea la figura 14-2).

14-12 Una pieza de aleación de aluminio 5182-O que había sido expuesta a agua salada presentó corrosión severa a lo largo de límites de granos. Explique esta observación con base en las fases esperadas a temperatura ambiente de esta aleación (vea la figura 14-2).



Aluminio serie 5000 7% de Mg para endurecimiento por precipitación

Figura 14-2 Diagrama de fases de aluminio-magnesio. (Repetida para los problemas 14-11 y 14-12.)

Sección 14-2 Aleaciones de magnesio y berilio

14-13 Con base en los datos de la tabla 14-6, estime la relación por la cual la resistencia a la fluencia del magnesio puede aumentar mediante aleación y tratamiento térmico, y compare con la relación de aleaciones de aluminio.

14-14 Suponga que una barra redonda de 0.6 m de largo debe soportar una carga de 1.78 kN libras sin ninguna deformación permanente. Calcule el diámetro mínimo de la barra si está hecha de
a) aleación de magnesio AZ80A-T5 y
b) aleación de aluminio 6061-T6.
Calcule el peso de la barra y el costo aproximado (con base en Mg y Al puros) en cada caso.

14-15 Una varilla de 10 m de largo y 5 mm de diámetro debe alargarse no más de 2 mm bajo carga. Determine la fuerza máxima que se puede aplicar si la varilla está hecha de
a) aluminio,
b) magnesio y
c) berilio.

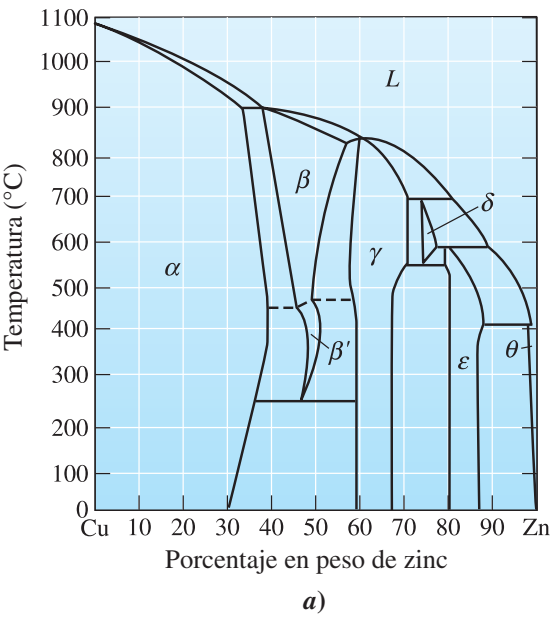
14-16 Se propone un nuevo proceso para endurecer una aleación Mg-Al. En la solicitud de la patente se sugiere que debe solidificarse Al 35 %p a 250°C. ¿Es esto posible o debería descartarse como físicamente imposible?

Sección 14-3 Aleaciones de cobre

14-17 *a*) Explique cómo se elabora el cobre puro. *b*) ¿Cuáles son algunas de las propiedades importantes del cobre? *c*) ¿Qué es el latón? *d*) ¿Qué es el bronce? *e*) ¿Por qué la Estatua de la Libertad es verde?

14-18 Se dice que el cobre puede contener hasta 40% de Zn o 9% de Al y todavía ser de una sola fase. ¿Cómo explica este enunciado con base en el diagrama de fases del sistema Cu-Zn de la figura 14-5*a*)?

14-19 Compare el porcentaje de aumento de la resistencia a la fluencia del aluminio, del magnesio y del cobre recocidos comercialmente puros, por endurecimiento por deformación. Explique las diferencias observadas.



a)

Figura 14-5 *a*) Diagrama de fases binario del sistema cobre-zinc. (Repetida para el problema 14-18.)

14-20 ¿Qué rangos de temperatura corresponden a las fases de las siguientes aleaciones Cu-Sn?
a) η a 60% en peso de Sn
b) ζ a 34% en peso de Sn
c) γ a 30% en peso de Sn
d) α a 0% en peso de Sn

14-21 Se desea producir un bronce al aluminio templado y revenido que contenga 13% de Al. Recomiende un tratamiento térmico y las temperaturas apropiadas. Calcule la cantidad de cada fase después de cada paso del tratamiento.

14-22 Diversas aleaciones de fundición tienen un alto contenido de plomo; no obstante, el contenido de Pb en aleaciones forjadas es comparativamente bajo. ¿Por qué no se agrega más plomo

a las aleaciones forjadas? ¿Qué precauciones deben tomarse cuando una aleación de plomo forjada se trabaja en caliente o recibe un tratamiento térmico?

14-23 ¿Esperaría usted que la resistencia a fracturas en aluminio al bronce templado y revenido fuera alta o baja? ¿Habría diferencia en la resistencia de la aleación a la formación de grietas en comparación con el crecimiento de grietas? Explique su respuesta.

14-24 Con base en los diagramas de fases, estime las solubilidades de Ni, Zn, Al, Sn y Be en cobre a temperatura ambiente. ¿Estas solubilidades son esperadas en vista de las condiciones de Hume-Rothery sobre la solubilidad sólida? Fundamente su respuesta.

Sección 14-4 Aleaciones de níquel y cobalto

14-25 El Hastelloy se usa en reactores químicos, tuberías y buques que contienen materiales caros altamente corrosivos. El Hastelloy está hecho en su mayoría de níquel. ¿Cuánta carga adicional puede sostener un Hastelloy B-2 en comparación con el níquel puro trabajado en frío?

14-26 Con base en la fotomicrografía de la figura 14-7*a*), ¿esperaría usted que el precipitado γ' o los carburos den mayor efecto de endurecimiento en superaleaciones a bajas temperaturas? Explique su respuesta.

14-27 La densidad del Ni_3Al es de 7,500 kg/m^3. Suponga que una aleación de Ni-5% en peso de Al se calienta de modo que todo el aluminio reacciona con el níquel para producir Ni_3Al. Determine el porcentaje en volumen del precipitado Ni_3Al en la matriz de níquel.

Sección 14-5 Aleaciones de titanio

14-28 Cuando el acero se une usando soldadura por arco, sólo la zona de fusión líquida debe ser protegida por un gas o flujo. Cuando se suelda titanio, los lados delantero y trasero del metal soldado deben protegerse. ¿Por qué deben tomarse estas precauciones adicionales cuando se une titanio?

a)

Figura 14-7 *a*) Microestructura de una superaleación, con carburos en los límites de granos y precipitados γ' en la matriz (15,000 ×). [De ASM Handbook, *vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*.] (Repetida para el problema 14-26.)

14-29 Una aleación de Ti-15% V y una de Ti-35% V se calientan a la temperatura más baja a la que se forma apenas sólo β. A continuación se templan y recalientan a 300°C. Describa los cambios en la microestructura durante el tratamiento térmico de cada una de las aleaciones, y señale la cantidad de cada fase. ¿Cuál es la matriz y cuál es el precipitado en cada caso? ¿Cuál es un proceso de endurecimiento por envejecimiento? ¿Cuál es un proceso de templado y revenido? [Vea la figura 14-12*a*).]

14-30 Una aleación de Ti-Mn contiene 20% en peso de manganeso y se mantiene a 550°C. ¿Qué fase o fases están presentes? Vea la figura 14-8 *d*).

14-31 Determine la resistencia específica de las aleaciones más fuertes de Al, Mg, Cu, Ti y Ni. En

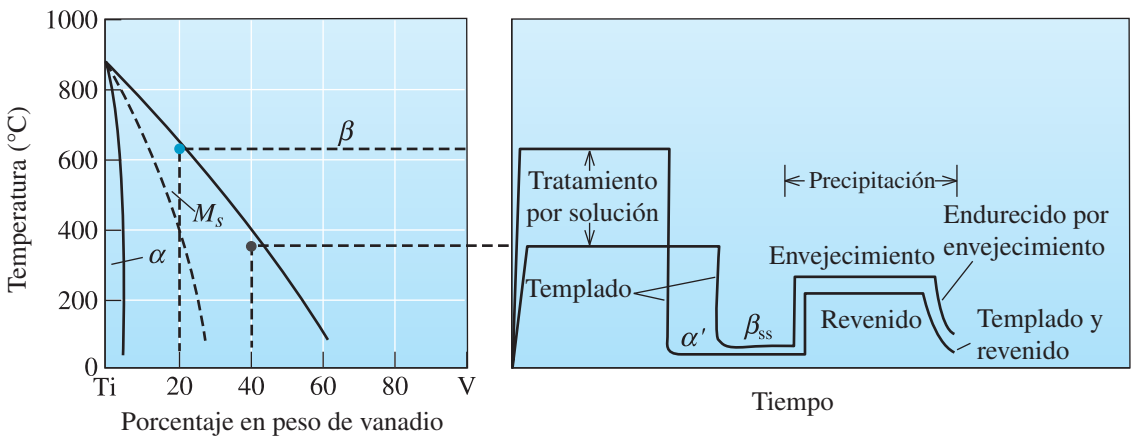


Figura 14-12 *a*) Tratamiento térmico para aleaciones de titanio α-β. (Repetida para el problema 14-29.)

sus cálculos, use las densidades de los metales puros, en lb/pulg^3. Trate de explicar su orden.

Sección 14-6 Metales refractarios y preciosos

14-32 ¿Qué es un metal o una aleación refractaria? ¿Qué es un metal precioso?

14-33 Se incrementa la temperatura de una pieza de tungsteno con recubrimiento. ¿Qué ocurre cuando el recubrimiento protector en una pieza de tungsteno se expande más que el tungsteno? ¿Qué sucede cuando el recubrimiento protector de una pieza de tungsteno se expande menos que el tungsteno?

14-34 ¿Para qué aplicaciones se usan Pt, Rh, Pd y Ag?

14-35 Enumere los metales refractarios con base en su idoneidad para servicios criogénicos.

14-36 Se agregan nanopartículas (3 nm de diámetro) de platino con un peso total de 1 miligramo a los convertidores catalíticos de automóviles para facilitar las reacciones de oxidación. Como el Pt es un metal caro, se está explorando un método para recubrir nanopartículas de hierro (Fe) para reducir los costos del metal catalítico. Si se recubren partículas de Fe de 3 nm de diámetro con 1 nm de Pt para obtener la misma área superficial efectiva con menos partículas y menos Pt, calcule la diferencia en costo y peso del catalizador. Suponga que el costo del Pt es de $40/g y el del Fe es de $0.005/g. La densidad del Fe es de 7870 kg/m^3 y la del Pt es de 21,450 kg/m^3.

Problemas de diseño

14-37 Una pieza para el soporte de un motor de un avión privado debe ocupar un volumen de 6×10^{-5} m^3, con un grosor mínimo de 5 mm y un ancho mínimo de 40 mm. La carga en la pieza durante el servicio debe ser hasta de 75,000 N. Se espera que la pieza permanezca por debajo de 100°C durante el servicio. Diseñe el material y el tratamiento que funcione de manera satisfactoria en esta aplicación.

14-38 Usted desea diseñar el peldaño de una escalera. Ésta debe ser de peso ligero para que se pueda transportar y usar fácilmente. Los peldaños de la escalera deben medir 6.35 mm × 25.4 mm y medir 305 mm de largo. Diseñe el material y el procesamiento de los peldaños.

14-39 Se ha determinado que se necesita una aleación que tenga una densidad de 2300 ± 50 kg/m^3 que debe ser fuerte, pero también tener ductilidad. Diseñe el material y el procesamiento que satisfaga estos requisitos.

14-40 Se desea diseñar un aparato de montaje que posicione y apunte un láser para corte de precisión de un material compuesto. ¿Qué requisitos de diseño podrían ser importantes? Diseñe el material y el procesamiento que satisfaga estos requisitos.

14-41 Diseñe una aleación de níquel-titanio que produzca un precipitado de 60% en volumen de Ni_3Ti en una matriz pura de níquel.

14-42 Una palanca activadora en un aparato eléctrico debe abrir y cerrar casi instantáneamente y portar una carga alta cuando se cierre. ¿Qué requisitos de diseño deben ser importantes para esta aplicación? Diseñe el material y el procesamiento para satisfacer estos requisitos.

14-43 Un aspa de ventilador de una planta de productos químicos debe operar a temperaturas de hasta 400°C bajo condiciones más bien corrosivas. En ocasiones material sólido se incrusta e impacta en el ventilador. ¿Qué requisitos de diseño serían importantes? Diseñe el material y el procesamiento para esta aplicación.

Problemas por computadora

14-44 Sistema de identificación de bases de datos de aleaciones. Edite un programa de cómputo que le solicite al usuario ingresar un código de tres o de cuatro dígitos de aleaciones de aluminio (tabla 14-3). Luego, solicite al usuario que le proporcione un dígito a la vez o elabore una forma de comparar diferentes dígitos en fila. Esto será seguido por una letra y un número (por ejemplo T y 4).

En consecuencia, el programa debe proporcionar al usuario alguna información más detallada acerca del tipo de aleación. Por ejemplo, si el usuario ingresa 2024 y luego T4, el programa debe dar una salida que especifique que *a*) la aleación es de tipo forjado, *b*) Cu es el principal elemento de aleación (porque el primer dígito es 2) y *c*) es naturalmente envejecido. No haga el programa demasiado complejo. La idea principal es que usted vea cómo se diseñan bases de datos sobre aleaciones.

Problemas Knovel[MR]

K14-1 No todas las aleaciones de aluminio se pueden soldar fácilmente. Señale unas clases de aleaciones de aluminio que se puedan soldar con facilidad. Elabore una lista de algunas técnicas recomendadas de soldadura para aleaciones de aluminio.

K14-2 Elabore una lista de varias aleaciones de aluminio forjado con resistencias a la tensión entre 70-105 MPa.

Las cerámicas comprenden una clase amplia y diversa de materiales con numerosas aplicaciones, que van desde el arte, en las formas coloridas e intrincadas de los vidrios, a la práctica, en las losetas de los transbordadores espaciales. Las cerámicas desempeñan un papel muy importante en una amplia gama de tecnologías electrónicas, magnéticas, ópticas y energéticas, incluyendo, por ejemplo, condensadores, componentes de memorias, lentes telescópicos y soportes catalíticos. Los materiales cerámicos tradicionales sirven como refractarios (materiales resistentes al calor) para el procesamiento de metales y aplicaciones comunes como tinas de baño, lavabos y vajillas. (*Imagen cortesía de la NASA/kaca kaca/Shutterstock.com.*)

CAPÍTULO

15

Materiales cerámicos

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Qué material cerámico se encuentra en huesos y dientes?*
- *¿Qué hace que algunos diamantes sean amarillos?*
- *¿Qué material se usa para proteger a un transbordador espacial de las altas temperaturas durante su regreso a la Tierra?*
- *¿De qué está hecha la cinta magnética de una tarjeta de crédito?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Definir las cerámicas y reconocer que esta clase de materiales engloba sólidos inorgánicos no metálicos tanto cristalinos como amorfos.
- Identificar las aplicaciones de diversos materiales cerámicos.
- Identificar algunas de las estructuras cristalinas más comunes en las cerámicas cristalinas.
- Identificar algunos de los defectos más comunes en las cerámicas cristalinas.
- Elegir los parámetros de procesos y procedimientos más apropiados para la fabricación de componentes cerámicos.
- Comprender la estructura de la sílice y los compuestos de silicatos.
- Comprender la forma en que las propiedades de la sílice y los silicatos se ven alteradas con la incorporación de otros óxidos.

Las cerámicas, los metales y los polímeros son las clases principales de materiales que analizamos en el capítulo 1. Los metales se definen por su estructura electrónica, que por lo general cuenta con uno o dos electrones de valencia que le confieren propiedades únicas, como alta resistencia, ductilidad y alta conductividad eléctrica y térmica. Los polímeros se forman por medio de largas cadenas de moléculas orgánicas, como se analizará en el capítulo 16. Al igual que los metales, los semiconductores tienen una estructura electrónica

única (capítulo 19) que permite que sus conductividades eléctricas sean controlables con precisión, lo cual los hace útiles en aplicaciones electrónicas como transistores y apagadores eléctricos. Pero, ¿qué son los materiales cerámicos? Por lo general, reconocemos las cerámicas que nos resultan familiares en nuestra vida cotidiana, como en retretes, lavabos, platos, ventanas, materiales aislantes en las bujías y algunos componentes de ingeniería avanzada en microelectrónica y optoelectrónica. El cuerpo humano tiene la increíble capacidad de crear hidroxiapatita, una cerámica que se encuentra en huesos y dientes. Otras cerámicas naturales son los diamantes y las gemas, como los zafiros y las esmeraldas. Los materiales cerámicos pueden ser transparentes y generalmente son quebradizos, malos conductores eléctricos y buenos aislantes térmicos. Siempre son inorgánicos y pueden ser cristalinos, parcialmente cristalinos o amorfos. Asimismo, pueden ser una combinación entre un metal y un material no metálico (por ejemplo, los óxidos, carburos, nitritos, sulfuros, fluoruros, etc.) y varían de forma significativa en sus propiedades electrónicas. Los materiales cerámicos pueden formarse como monocristales en películas delgadas (por ejemplo, el nitruro de galio en los láseres) o nanotubos (como el nitruro de boro o carbono). Se pueden fabricar componentes por medio de la sinterización de polvos para herramientas de corte, como el carburo de tungsteno, o pueden ser soplados para conferirles formas por medio de calor y herramientas de modelado, como los vidrios. ¿Existe una sola definición que contenga todas las características de las cerámicas sin excluir a los materiales que consideramos comúnmente en esta categoría? W.D. Kingery es considerado el padre de la cerámica moderna y escribió un texto seminal que brinda la mejor definición de cerámica como un "sólido inorgánico no metálico." Esta es una definición amplia e incluyente que considera también al diamante y al grafito al ser formas alotrópicas inorgánicas del carbono. En este rango pueden existir diferencias muy grandes y las cerámicas pueden emplearse para distintos propósitos. Los materiales cerámicos incluyen los cristales, los vidrios y los vidrios cerámicos. Analizaremos estas tres categorías a lo largo del capítulo. La tabla 15-1 ofrece una lista parcial de las funciones y aplicaciones de algunos materiales cerámicos.

Tabla 15-1 Funciones y aplicaciones de algunas cerámicas

Función	Aplicación	Ejemplos de cerámicas
Eléctrica	Dieléctricos para condensadores	$BaTiO_3$, $SrTiO_3$, Ta_2O_5
	Dieléctricos para microondas	$Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$, $Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ $BaTi_4O_9$, $Ba_2Ti_9O_{20}$, $Zr_xSn_{1-x}TiO_4$, Al_2O_3
	Óxidos conductores	In-doped SnO_2 (ITO)
	Superconductores	$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)
	Encapsulados eléctricos	Al_2O_3
	Aisladores	Porcelana
	Celdas de combustible de óxido sólido	ZrO_2, $LaCrO_3$
	Piezoeléctrica	$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (PZT), $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$
	Electroóptica	PZT dopado con La (PLZT), $LiNbO_3$
Magnética	Medio de grabación	γ-Fe_2O_3
	Ferrofluidos, tarjetas de crédito	Fe_3O_4
	Circuladores, aisladores	Ferrita al níquel-zinc
	Inductores, imanes	Ferrita al manganeso-zinc
Óptica	Fibras ópticas	Dopado con SiO_2
	Vidrios	Base de SiO_2
	Láseres	Al_2O_3, almandinato de itrio y aluminio (YAG)
	Iluminación	Al_2O_3, vidrios
Automotriz	Sensores de oxígeno, celdas de combustible	ZrO_2
	Soporte catalítico	Cordierita
	Bujías	Al_2O_3
	Neumáticos	SiO_2
	Parabrisas/ventanas	Vidrios base de SiO_2

Tabla 15-1 Funciones y aplicaciones de algunas cerámicas *(continuación)*

Función	Aplicación	Ejemplos de cerámicas
Mecánica/estructural	Herramientas de corte	WC-Co cermets Silicio-aluminio-oxiniruro (Sialon) Al_2O_3
	Materiales compuestos	Fibras de vidrio de sílice, SiC, Al_2O_3
	Abrasivos	SiC, Al_2O_3, diamante, BN, $ZrSiO_4$
Biomédica	Implantes	Hidroxiapatita
	Odontología	Porcelana, Al_2O_3
	Imágenes de ultrasonido	PZT
Construcción	Edificios	Concreto Vidrio Muebles de baño
Otras	Aplicaciones militares	PZT, B_4C
	Materiales para blindajes	
	Sensores	SnO_2
	Nuclear	UO_2 Vidrios para eliminación de desechos
	Procesamiento de metales	Refractarios basados en alúmina y en sílice, sensores de oxígeno, moldes de fundición, etc.
Química	Catalizadores	Óxidos varios (Al_2O_3, ZrO_2, ZnO, TiO_2)
	Filtración de aire y líquidos	
	Sensores	
	Pinturas, hules	
Doméstica	Azulejos, muebles para baño, línea blanca, utensilios de cocina, alfarería, artes, joyería	Arcilla, alúmina y cerámicas basadas en sílice, vidrios-cerámicos, diamante, rubí, zirconia cúbica y otros cristales

Para estudiar los materiales cerámicos, retomaremos el conocimiento básico adquirido en los capítulos anteriores, incluyendo los enlaces (capítulo 2), las estructuras cristalinas (capítulo 3), los defectos (capítulo 4), la difusión (capítulo 5), las propiedades mecánicas (capítulo 6) y la fractura (capítulo 7). También analizaremos la síntesis, el procesamiento y las aplicaciones de los materiales cerámicos. En el capítulo 19 examinaremos las propiedades eléctricas de las cerámicas y el efecto piezoeléctrico que algunas pueden tener. Sus propiedades ópticas las analizaremos en el capítulo 21.

15-1 Enlace en los materiales cerámicos

Los materiales cerámicos se mantienen unidos por medio de enlaces primarios sólidos. Éstos son predominantemente iónicos o covalentes con algunos enlaces mixtos que pueden incluir enlaces metálicos. Como se revisó en el capítulo 2, una depresión profunda potencial incrementa las temperaturas de fusión (vea la figura 2-20). Se requiere una gran cantidad de energía térmica para hacer que los átomos o los iones se separen a distancias interatómicas o interiónicas mayores, provocando así la fusión. Los materiales con un alto punto de fusión tienden a presentar un módulo elástico alto, lo que significa que sus enlaces son rígidos. Los materiales que tienen enlaces predominantemente iónicos o covalentes carecen de electrones libres para conducir electricidad porque éstos se comparten o transfieren para alcanzar una configuración electrónica s^2p^6 completa. Al carecer de electrones libres, los materiales cerámicos son buenos aislantes térmicos, con algunas excepciones, entre las que se encuentra el diamante, que cuenta con enlaces extraordinariamente rígidos que transportan de manera eficiente el calor (secciones 2-7 y 22-3). En la sección 15-3 examinaremos cómo estos enlaces confieren alta resistencia y dureza, así como fragilidad, a las cerámicas.

Tabla 15-2 Propiedades de materiales cerámicos policristalinos que se encuentran comúnmente

Material	Punto de fusión (°C)	Coeficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6}$ cm/cm)/°C	Dureza Knoop (HK) (100g)
Al_2O_3	2000	~6.8	2100
BN	2732	0.57[a], −0.46[b]	5000
SiC	2700	~3.7	2500
Diamante	3550	1.02	7000
Mulita	1810	4.5	—
TiO_2	1840	8.8	—
ZrO_2 cúbica	2700	10.5	—

[a] *Perpendicular a la dirección de presión.*
[b] *Paralela a la dirección de presión.*

Tabla 15-3 Propiedades mecánicas de materiales cerámicos avanzados seleccionados

Material	Densidad (g/cm^3)	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Tenacidad a la fractura (MPa $\sqrt{m}$)
Al_2O_3	3.98	207	552	3025	386×10^3	5.5
SiC (sinterizado)	3.1	172	552	3860	414×10^3	4.4
Si_3N_4 (unido por reacción)	2.5	138	241	1030	207×10^3	3.3
Si_3N_4 (prensado en caliente)	3.2	552	896	3450	310×10^3	5.5
Sialon	3.24	414	965	3450	310×10^3	9.9
ZrO_2 (parcialmente estabilizado)	5.8	448	690	1860	207×10^3	11.0
ZrO_2 (con tenacidad mejorada por transformación)	5.8	345	793	1725	200×10^3	12.1

Ejemplo 15-1 *Rigidez de los enlaces y módulo elástico*

Demuestre que el módulo elástico E de un material es directamente proporcional a la rigidez del enlace considerando una carga uniaxial que se aplicará a una celda unitaria cúbica.

SOLUCIÓN

Suponga que el parámetro de red a es la distancia de equilibrio entre los átomos. El esfuerzo ingenieril S que se desarrolla cuando se aplica la carga P a un área interseccional a^2 es

$$S = \frac{P}{a^2}$$

Se aplica la ley de Hooke para la carga elástica, de manera que

$$S = \frac{P}{a^2} = Ee$$

donde e es la deformación ingenieril, que también puede expresarse como

$$e = \frac{\Delta a}{a}$$

donde Δa es la extensión y la carga P puede expresarse como

$$P = k\Delta a$$

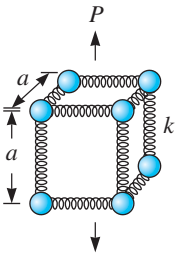


Figura 15-1 Los enlaces entre los átomos pueden representarse como resortes con una rigidez k en esta simple aproximación. El parámetro de red de una celda unitaria cúbica es a.

donde k es la rigidez de los enlaces, que pueden representarse como resortes lineales (vea la figura 15-1). Resolviendo la ecuación E, para

$$E = \frac{P}{a^2 e} = \frac{k\Delta a}{a^2}\frac{a}{\Delta a} = \frac{k}{a}$$

Esta ecuación es una aproximación general y no debe considerarse estrictamente como correcta, pero demuestra que el módulo elástico es proporcional a la rigidez entre los átomos o iones en un sólido. En la medida en que la rigidez aumenta, el módulo elástico también lo hace.

15-2 Estructura de los materiales cerámicos cristalinos

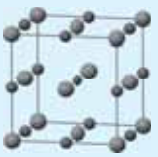
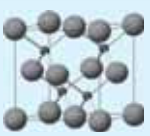
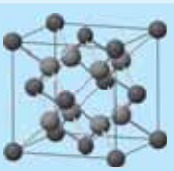
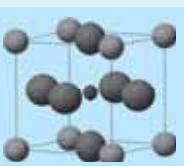
Los materiales cerámicos pueden ser cristalinos, parcialmente cristalinos o amorfos. En la sección 15-7 analizaremos los vidrios inorgánicos y los materiales parcialmente cristalinos en la sección 15-8. Los materiales cerámicos cristalinos presentan cientos de estructuras cristalinas. Muchas de ellas fueron descritas en las secciones 3-7 y 3-8, entre las que se encuentran el cloruro de sodio, la esfalerita, la fluorita, el corindón, la perovskita, y las estructuras cúbicas en los diamantes. En la tabla 15-4 encontrará las estructuras cristalinas más comunes en las cerámicas, sus descripciones de redes y bases, y algunos ejemplos de materiales cerámicos que adoptan estas estructuras.

Como se analizó en la sección 3-7, muchas de las estructuras iónicas en las cerámicas pueden verse como un paquete de aniones con cationes más pequeños en los sitios intersticiales. Por ejemplo, la estructura del cloruro de sodio es una estructura cúbica centrada en la cara de aniones de Cl con todos los sitios octaédricos ocupados por cationes de Na. Recuerde que las estructuras que adoptan los componentes cerámicos están en función del radio relativo de los átomos o iones en el compuesto y la necesidad de mantener su neutralidad eléctrica (sección 3-7). En algunos casos la forma más simple o correcta de describir una estructura cristalina cerámica no necesariamente es a través de un paquete de aniones con cationes en los sitios intersticiales. También es importante observar que aun cuando los cationes ocupan estos sitios, no necesariamente llevan un factor de empaquetamiento mayor que el de los metales.

Alúmina

Uno de los materiales cerámicos que más se usan es el óxido de aluminio, también conocido como alúmina. Este material existe como varios polimorfos cristalinos (sección 3-4), algunos con estructuras cristalinas bastante complejas. Esto ocurre también con la sílice (dióxido de silicio) que analizaremos posteriormente. La forma conocida como α-Al_2O_3, que contiene el corindón mineral (sección 3-7), presenta muchas de las características típicas del material cerámico. El polvo de corindón es muy duro y se emplea como compuesto pulidor. Algunas variantes de la alúmina son la base de gemas como el zafiro y el rubí. Elementos como el titanio, el hierro, el cromo y el cobre producen gemas con base de alúmina con colores específicos. La alúmina se emplea en aparatos electrónicos, recubrimientos transparentes que no se rayan y carátulas de relojes e instrumentos. También se emplea como **refractario** (es decir, que mantiene su carátulas a altas temperaturas) para

Tabla 15-4 Tabla de algunas estructuras cerámicas cristalinas con la descripción de redes y bases, y algunos ejemplos de cerámicas que adoptan estas formas. La lista no es exhaustiva.

	Estructura	Nombre/Redes y bases	Algunos ejemplos
1		*Cloruro de sodio (NaCl)* Red CCCa con base de Cl (0,0,0) y Na (1/2,0,0)	BaO, CaO, MgO, SrO, TiC, TiO
2		*Diamante cúbico* Red CCCa con base de C (0,0,0) y C (1/4,1/4,1/4)	Diamante
3		*Blenda de zinc cúbica (ZnS) también conocida como esfarelita* Red CCCa con base de S (0,0,0) y Zn (1/4,1/4,1/4)	β-SiC
4		Fluorita (CaF_2) Red CCCa con base de Ca (0,0,0), F (1/4,1/4,1/4) y F (1/4,1/4,3/4)	BaF_2, CaF_2, CeO_2, ThO_2, UO_2, ZrO_2
5		*Blenda de zinc hexagonal (ZnS), también conocida como wurtzita* Red hexagonal con base de S (0,0,0), S(2/3,1/3,1/2), Zn (0,0,3/8), Zn (2/3,1/3,7/8)	α-SiC, BeO, ZnO,
6		*Perovskita ($CaTiO_3$)* Red cúbica simple con base de Ca (0,0,0), Ti (1/2,1/2,1/2) y O (1/2, 0, 1/2) y O (1/2,1/2,0)	$BaTiO_3$, $CaTiO_3$, $PbZrO_3$, $SrTiO_3$
7		*Antifluorita (Na_2O)* Red CCCa con base O (0,0,0), Na (1/4,1/4,1/4) y Na (1/4,1/4,3/4)	K_2O, Li_2O, Na_2O

metales fundidos y en aplicaciones donde se debe operar un material a altas temperaturas con gran resistencia. La aplicación clásica de la alúmina como aislante se da en las bujías.

En la sección 3-6 se describieron los sitios intersticiales tetraédricos y octaédricos para tres estructuras cúbicas básicas. Estos sitios se encuentran también en los cristales hexagonales. La alúmina cristalina puede analizarse como una estructura hexagonal cerrada (CH) de iones de oxígeno, con aluminio en 2/3 partes de los sitios octaédricos en patrones ordenados específicos. Como existe el mismo número de sitios octaédricos y de red en una estructura CH (al igual que en la estructura CCCa), la estequiometría de la alúmina requiere que 1/3 de los sitios octaédricos quede vacante y 2/3 se llenen de aluminio. La celda unitaria de alúmina contiene 30 átomos, o seis unidades de fórmula Al_2O_3.

Ejemplo 15-2 *Carburo de silicio*

El carburo de silicio (SiC) tiene una extraordinaria resistencia a la oxidación a temperaturas incluso por arriba del punto de fusión del acero. El SiC se usa con frecuencia como recubrimiento para metales, materiales compuestos de carbono-carbono y otros materiales cerámicos, para protegerlos a temperaturas extremas. También se usa como abrasivo en las ruedas rectificadoras y como un particulado y refuerzo fibroso tanto en matrices metálicas como en matrices de materiales compuestos. Asimismo, se usa para la fabricación de elementos calefactores para hornos. El SiC existe como dos polimorfos: α-SiC, que tiene una estructura hexagonal de blenda de zinc (wurtzita), y β-SiC, con una estructura cúbica de blenda de zinc (esferalita).

¿Cuántos átomos de cada tipo hay por celda unitaria en el α-SiC? ¿Qué tipo de enlace espera que sea dominante en su comportamiento? Explique.

SOLUCIÓN

La estructura cristalina del α-SiC puede describirse como una red hexagonal con base de Si (0,0,0), Si (2/3,1/3,1/2), C (0,0,3/8) y C (2/3,1/3,7/8). Existe un punto de red por celda unitaria en la red hexagonal y dos átomos de Si en las bases, por lo que hay dos átomos de Si por celda unitaria.

Existe un punto de red por celda unitaria en la red hexagonal y dos átomos de C en las bases, por lo que hay dos átomos de C por celda unitaria. La figura 15-2 muestra la celda unitaria de SiC.

Tanto el Si como el C pertenecen al grupo IV de los elementos. La estructura electrónica de Si es [Ne]$3s^2 3p^2$ y la de C es [He]$2s^2 2p^2$. (En realidad, en su forma sólida cada átomo de Si y C forma cuatro orbitales híbridos sp^3 con un electrón; después los electrones son compartidos de forma covalente entre los átomos de Si y de C para completar cuatro orbitales por átomo.) Se puede calcular la fracción de enlaces covalentes empleando la ecuación 2-1 de la sección 2-6, que incluye un término para la diferencia entre las electronegatividades de los dos elementos. La electronegatividad del Si es 1.8 y la del C es 2.5.

$$\text{Fracción covalente} = \exp(-0.25\Delta E^2)$$

$$\text{Fracción covalente} = \exp[-0.25(2.5-1.8)^2] = 0.88$$

La mayoría de los enlaces son covalentes.

Una vez más no se han considerado los sitios intersticiales específicos para estructuras hexagonales, pero la estructura de la wurtzita puede visualizarse como una estructura hexagonal cerrada de átomos SI con la mitad de los sitios tetraédricos ocupados por átomos de C. Como ejemplo, los sitios tetraédricos pueden formarse al unir tres átomos de la estructura CH en la capa A con un cuarto átomo en la capa B. De este modo, cada átomo de carbono está rodeado por cuatro átomos de silicio enlazados que están rodados y enlazados con cuatro átomos de carbono, como se muestra en la figura 15-2.

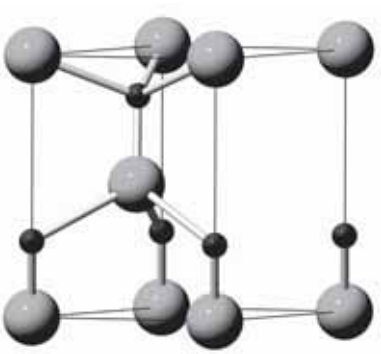


Figura 15-2 Celda unitaria de SiC. Los átomos de Si se muestran en gris claro y los de C en gris oscuro.

Ejemplo 15-3 *Zirconia cúbica*

La zirconia cúbica (ZrO_2) es una alternativa económica al diamante para joyería. Debido a su alta conductividad iónica, también se emplea para crear sensores de oxígeno en los motores automotrices y para medir el oxígeno disuelto en los aceros fundidos. La zirconia es un material refractario aditivo en las cerámicas electrónicas que existe como diferentes polimorfos dependiendo de la temperatura y la presión. La zirconia cúbica es inestable a temperatura ambiente, a menos de que haya sido dopada con aditivos como Y_2O_3, conocida como itria. (Observe que las letras *ia* al final de los términos "itria" o "zirconia" significan que "contiene oxígeno", por ejemplo, "itrio con oxígeno" y "zirconio con oxígeno".) La celda unitaria de la zirconia cúbica puede describirse como una red cúbica de zirconio centrada en la cara con todos los sitios tetraédricos ocupados por oxígeno.

¿Cuál es la estructura cristalina de la zirconia cúbica? Explique cómo la estequiometría del ZrO_2 es consistente con esta estructura.

SOLUCIÓN

Es la estructura cristalina de fluorita (ver la tabla 15-4). En una celda unitaria de zirconia cúbica encontramos cuatro iones de Zr y ocho iones de O. La razón de los iones Zn^{4+} en relación con los iones O^{2-} es de 4:8 o 1:2, lo que es igual a la estequiometría del ZrO_2. Observe que es una estructura cristalina en la que no podemos pensar en un arreglo cerrado de aniones. En realidad, los aniones son los iones más grandes, pero en la descripción estructural ocupan los sitios tetraédricos más pequeños. La estructura de antifluorita (Na_2O) (vea la tabla 15-4) puede visualizarse como un paquete cerrado de aniones CCCa en donde los cationes ocupan todos los sitios tetraédricos.

Ejemplo 15-4 *Óxido de estroncio*

El óxido de estroncio (SrO), también conocido como estroncia, tiene la estructura cristalina del NaCl. Escriba las descripciones de red y de base del óxido de estroncio.

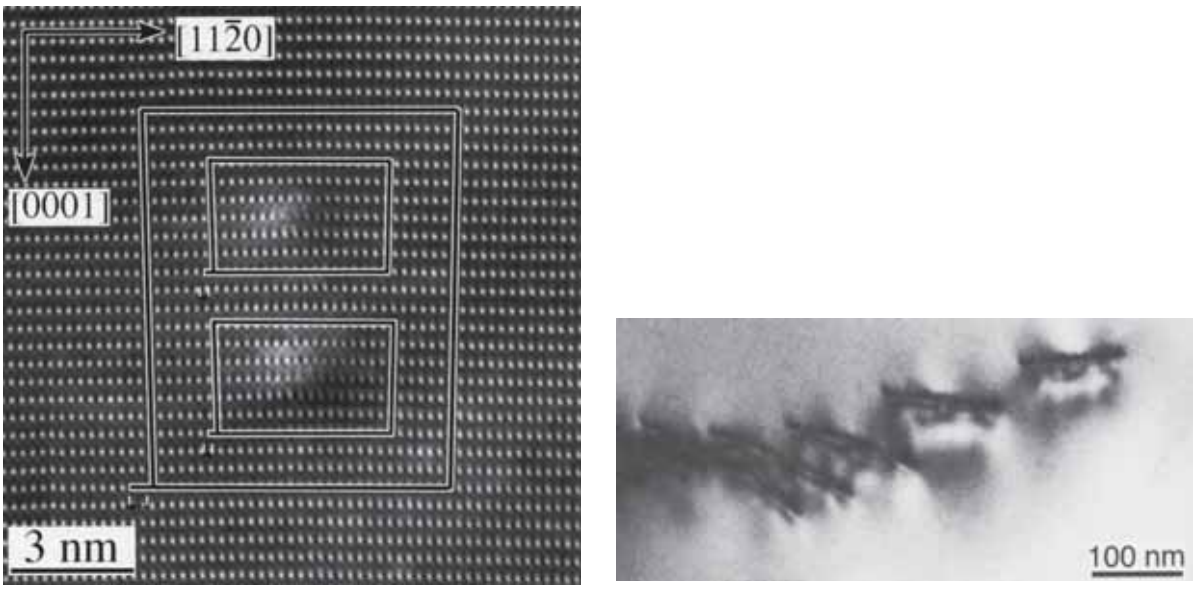
SOLUCIÓN

El SrO tiene una red CCCa con base de O^{2-} (0, 0, 0) y Sr^{2+} (1/2, 0, 0).

El SrO tiene una razón de radio para los iones de 1.12Å/(1.32 Å)= 0.85. Esta razón indica que el SrO debe tener la estructura cristalina de CsCl. En este ejemplo podemos observar que aun cuando las razones de radio proporcionan lineamientos generales sobre la estructura probable de un material, ésta no resulta de forma estricta en la naturaleza de cada cristal.

15-3 Defectos en las cerámicas cristalinas

En la sección 4-2 analizamos la nomenclatura empleada para describir los defectos en las cerámicas cristalinas haciendo énfasis en los distintos defectos puntuales. Uno de los lineamientos principales es que se debe mantener el balance de la carga ante la existencia de estos defectos. Todos los defectos puntuales descritos en esa sección ocurren en los materiales cerámicos y los defectos de Schottky se presentan sólo en los materiales con enlaces iónicos. Las cerámicas cristalinas tienen dislocaciones como las que se muestran en la figura 15-3 para la alúmina; sin embargo, es difícil que éstas se propaguen debido a la rigidez de sus enlaces atómicos y a que los vectores de Burgers son de mayor tamaño que en los metales. La naturaleza altamente unidireccional de los enlaces covalentes y las cargas alternantes que se presentan en los materiales con enlaces iónicos también impiden la propagación de las dislocaciones. Estas propiedades brindan dureza, fuerzas compresivas y módulos elásticos más altos, como se muestra en las tablas 15-2 y 15-3. En la siguiente sección analizaremos fallas como las grietas, poros y vacíos.



a) *b*)

Figura 15-3 *a*) Micrografía electrónica de alta resolución de las dislocaciones de borde en Al_2O_3 (*Y. Ikuhara*). *b*) Contraste de difracción de las dislocaciones en Al_2O_3. (Ceramic materials: science and engineering *por Norton, M.G; Carter C. Barry. Reproducido con autorización de SPRINGER en formato de libro a través del Copyright Clearance Center*).

Ejemplo 15-5 *Impurezas en los diamantes*

Los elegantes diamantes amarillos llamados diamantes tipo Ia, o canarios, contienen impurezas de nitrógeno a una concentración menor de 100 ppm. La presencia de nitrógeno genera niveles de absorción en la estructura de banda que hacen que el diamante absorba luz y adquiera color (vea el capítulo 19). Un diamante se ve amarillo cuando tiene nitrógeno a niveles inferiores de 100 partes por millón (ppm). Si la concentración de nitrógeno en un diamante es de 100 ppm, ¿cuál es la concentración de átomos de nitrógeno por celda unitaria y por centímetro cúbico? El parámetro de red del diamante es 3.5668×10^{-8} cm.

SOLUCIÓN

La estructura cúbica cristalina de un diamante contiene ocho átomos por celda unitaria. Si hay 100 átomos de nitrógeno por 10^6 átomos de carbono, es decir 100 ppm, entonces

$$\left(\frac{100 \text{ átomos de N}}{10^6 \text{ átomos de C}}\right)\left(\frac{8 \text{ átomos de C}}{\text{celda unitaria}}\right) = 8 \times 10^{-4} \text{ átomos de N/(celda unitaria) o 1250 celdas unitarias (átomo N)}$$

Suponiendo que la presencia de nitrógeno no altera el parámetro de red del diamante, entonces

$$\left(\frac{8 \times 10^{-4} \text{ átomos de N}}{\text{celda unitaria}}\right)\left[\frac{\text{celda unitaria}}{(3.5668 \times 10^{-8} \text{ cm})^3}\right] = 1.76 \times 10^{19} \text{ átomos de N/cm}^3$$

El diamante también tiene aplicaciones en la industria. Es el material más duro que existe de forma natural. Los diamantes industriales se emplean como abrasivos para moler y pulir, así como para cubiertas resistentes a la abrasión en diversas aplicaciones, como las herramientas de corte. Los diamantes sintéticos y las cubiertas tipo diamante se preparan por medio de procesos de deposición de vapores químicos (capítulo 19) y de alta temperatura y presión.

Ejemplo 15-6 *Dislocaciones en MgO*

La figura 15-4 muestra un patrón de dislocaciones en el óxido de magnesio (MgO), el cual tiene la estructura cristalina del cloruro de sodio y un parámetro de red de 0.396 nm. Observe que el sistema de deslizamiento del MgO es $\{\bar{1}0\}<110>$. Determine la longitud del vector de Burgers.

SOLUCIÓN

Comenzamos en la figura 15-4 dando una vuelta en el sentido de las manecillas del reloj alrededor de la dislocación en el punto x y después nos movemos a través de los espacios atómicos iguales en las dos direcciones horizontales y verticales para terminar en el punto y. Observe que es necesario que tanto las longitudes de los dos segmentos horizontales como las de ambos segmentos verticales sean iguales, aunque no es necesario que los segmentos horizontales y verticales sean iguales entre sí. La vuelta debe acercarse a un cristal perfecto. El vector **b** es el vector de Burgers. Dado que éste es paralelo a una dirección [110], debe ser perpendicular a los planos (110). La longitud de **b** es la distancia entre los dos planos adyacentes (110). Con ayuda de la ecuación 3-7,

$$d_{110} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \frac{0.396 \text{ nm}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = 0.280 \text{ nm}$$

El vector de Burgers tiene una dirección (110) y una longitud de 0.280 nm. Observe que hay dos mitades de planos de átomos en una dislocación: una compuesta de iones de magnesio y otra de iones de oxígeno (figura 15-4). La fórmula para calcular la magnitud de los vectores de Burgers se complica cuando los sistemas no son cúbicos. Es mejor considerar que la magnitud de los vectores de Burgers es igual a la distancia repetida en la dirección de deslizamiento.

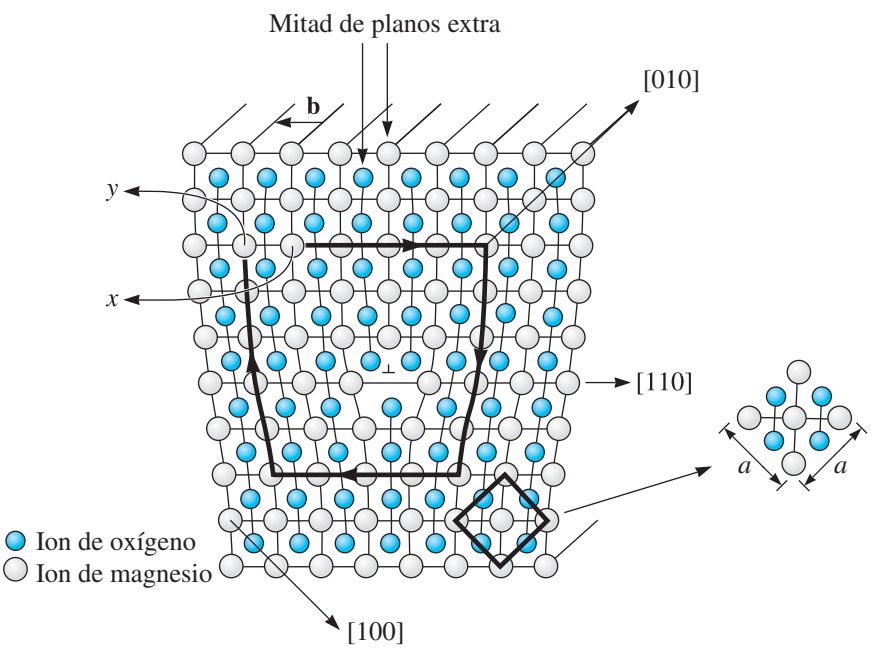


Figura 15-4 Dislocación de borde de MgO con dirección de deslizamiento y vector de Burgers (para el ejemplo 15-6). Este diagrama muestra un arreglo de iones en el plano (001); por lo tanto, la dirección [001] es perpendicular al plano de la página. La intersección muestra la disposición de una celda unitaria convencional de MgO. (*Basado en W.D. Kingery, H.K. Bowen, D.R. Uhlmann,* Introduction to Ceramics, *John Wiley, 1976.*)

Ejemplo 15-7 *Deslizamiento en MgO y Mg*

Con base en los principios de enlazamiento del MgO y Mg, y el esfuerzo Perierls-Nabarro, explique por qué es más difícil encontrar un deslizamiento en MgO que en Mg. Considere que el sistema de deslizamiento en Mg es {0001}<100> para fines de su análisis.

SOLUCIÓN

Como se determinó en el ejemplo 15-6, los espacios entre los planos de deslizamiento y **b** son de 0.280 nm para el MgO. Para el sistema de deslizamiento de Mg {0001}<100>, los planos interplanares son la mitad de la altura de la celda unitaria CH, o 0.5209 nm/2 = 0.260 nm, mientras que el vector de Burgers es la distancia entre los átomos en la dirección cerrada, o $a/2$ = 0.32087 nm/2 = 0.160 nm. El esfuerzo de Peierls-Nabarro está determinado por la ecuación 4-2,

$$\tau = c \exp\left(-\frac{kd}{b}\right)$$

donde τ es el esfuerzo cortante que se requiere para mover una dislocación, d el espacio interplanar entre los planos de deslizamiento adyacentes, b la magnitud de los vectores de Burgers y c y k son constantes para el material. Sin considerar las diferencias en c y k, observamos que el esfuerzo que se requiere para propagar una dislocación aumenta cuando la razón d/b disminuye. Por lo tanto, podemos esperar que el MgO con razón d/b de 1.0 requiera mayor esfuerzo para provocar una dislocación que Mg (con una razón d/b de 1.62) en donde el deslizamiento sería más difícil. Además, como se analizó en la sección 4-3, la propagación de las dislocaciones en materiales con enlaces iónicos requiere que los cationes se muevan más allá de otros cationes y que los aniones se muevan más allá de otros aniones, generando una repulsión electrónica que pondrá resistencia al movimiento de la dislocación.

15-4 Fallas en los materiales cerámicos

Los materiales cerámicos son susceptibles a presentar fallas como muescas, grietas y poros, debido a que el esfuerzo cortante que se requiere para propagar dislocaciones es alto. Los materiales cerámicos tienden a mostrar una fuerte compresión que suprime la propagación de grietas, así como una tensión débil en donde la propagación de grietas se exacerba. La resistencia a la fractura es la capacidad que tiene un material con fallas para resistir la aplicación de una carga. Cuando el factor de intensidad del esfuerzo excede la resistencia a la fractura del material, la grieta de propaga de forma inestable resultando en una falla (sección 7-1). Los materiales sensibles a las fallas muestran una distribución de resistencia que sigue la estadística de Weibull (sección 7-5). En los materiales quebradizos sólo se puede predecir la probabilidad de falla a un esfuerzo determinado, pero no el nivel de esfuerzo al que el material fallará. Es por ello que se requieren controles de calidad para estrechar la distribución del tamaño de las fallas con el fin de alcanzar su confiabilidad mecánica.

Realizar pruebas de tensión sobre materiales quebradizos es una tarea retadora por la dificultad que representa probar el material sin provocar una fractura inmediata. Por lo general, se emplean pruebas de flexión de tres o cuatro puntos para determinar las propiedades mecánicas. La prueba de indentación es un método común para determinar la resistencia a la fractura de las cerámicas frágiles. Las pruebas de indentación permiten llevar a cabo múltiples indentaciones para probar diversas variaciones en las propiedades y en la estructura del espécimen. La indentación provoca que se formen grietas radiales en la superficie del indentador cuando se aplica una carga, mismas que se propagan a medida que se incrementa el esfuerzo residual al retirar la carga del material. El factor de intensidad de la carga K_R que existe en las puntas de las grietas está determinada por

$$K_R = \beta_r \frac{P}{c^{3/2}} \qquad (15\text{-}1)$$

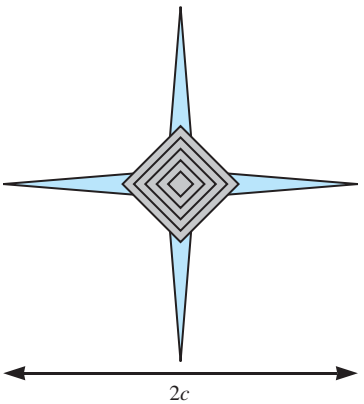


Figura 15-5 Un indentador de Vickers en un material frágil muestra la formación de grietas radiales con una longitud de $2c$.

donde β_r es una constante igual a $0.016\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}$ con módulo elástico E y dureza H, P es la carga aplicada y $2c$ la longitud de la grieta (vea la figura 15-5). Las grietas se detienen cuando K_R disminuye al punto de resistencia a la fractura del material K_{IC}. Vea la tabla 15-3 para la resistencia a la fractura de algunas cerámicas avanzadas.

Porosidad

Los poros representan el defecto de mayor importancia en los materiales cerámicos policristalinos. La presencia de poros suele ser perjudicial para las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos en bloque, en vista de que dichos poros son una localización preexistente a partir de la cual puede crecer una grieta. El módulo elástico y la resistencia disminuyen cuando aumenta la porosidad. La figura 15-6 muestra la forma en que disminuye la resistencia cuando la porosidad aumenta en el cemento (el cemento es la cerámica que se usa para unir el concreto y se analizará en la sección 15-11 y en el capítulo 18). La presencia de poros es una de las razones por las que los materiales cerámicos muestran un comportamiento tan frágil bajo carga de tensión. Dado que existe una distribución de tamaños de poros y el nivel general de porosidad se modifica, las propiedades mecánicas de estos materiales varían. Esta variación se mide utilizando la estadística de Weibull (capítulo 7). La presencia de poros, por otra parte, puede resultar de utilidad para incrementar la resistencia al impacto térmico (capítulo 22). En ciertas aplicaciones, como en filtros para metales calientes o para líquidos o gases, es deseable la presencia de poros interconectados.

Cuando un material no tiene poros, su densidad se conoce como densidad verdadera ρ. Un material con poros tiene una densidad inferior a su densidad verdadera. En un material cerámico los poros pueden estar interconectados o cerrados. La **porosidad aparente** es el porcentaje del volumen total de la cerámica que está ocupado por poros interconectados, que son aquellos que proporcionan los canales para que pasen los gases y los fluidos. Es una medida de permeabilidad —es decir, de la facilidad con la que los gases y los fluidos pasan a través del componente cerámico— y es una característica importante de un material cerámico poroso. La porosidad aparente se determina pesando el material cerámico seco (W_d) y volviendo a pesarlo tanto después de haber estado suspendido en agua (W_s) como después de haber sido retirado de la misma (W_w); la cerámica se cuelga de una balanza y se sumerge en un contenedor de agua; el peso del cable no es importante. Utilizando unidades de gramos:

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100 \tag{15-2}$$

Observe que el numerador es igual al volumen de los poros interconectados y el denominador es igual al volumen exterior de la cerámica incluyendo los poros. Esta equivalencia surge debido a que la densidad del agua es 1 g/cm^3.

Otra medida de porosidad es la **porosidad verdadera.** Este valor incluye tanto los poros interconectados como los no interconectados o cerrados (Porosidad verdadera = Porosidad aparente + Porosidad cerrada). Los poros cerrados no se pueden llenar con agua.

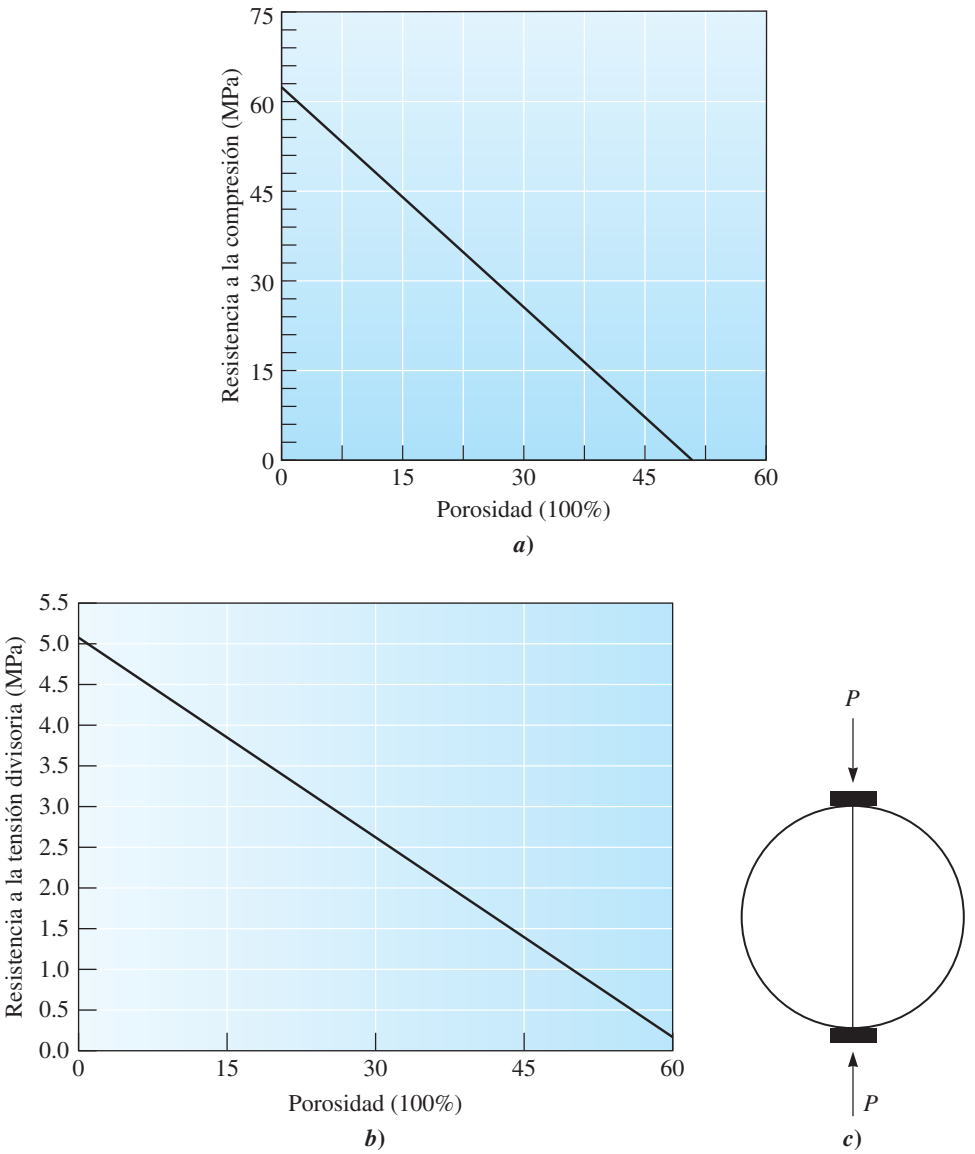


Figura 15-6 *a*) Resistencia a la compresión del cemento en función de su porosidad. *b*) Resistencia a la tensión divisoria del cemento en función de su porosidad empleando el método que se muestra en *c*), en el que un cilindro de cemento se somete a una carga *P* sobre el diámetro a lo largo del cilindro. La resistencia a la tensión divisoria es el esfuerzo al que el cilindro se rompe en dos mitades.

La porosidad verdadera, que se correlaciona mejor con las propiedades del material cerámico, es

$$\text{Porosidad verdadera} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100 \tag{15-3}$$

donde

$$B = \frac{W_d}{W_w - W_s} \tag{15-4}$$

La **densidad volumétrica** B es la razón del peso de la cerámica seca en relación con su volumen exterior incluyendo los poros, y ρ es la densidad verdadera del material cerámico sin porosidad. El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se determinan los niveles de porosidad en materiales cerámicos.

Ejemplo 15-8 *Materiales cerámicos de carburo de silicio*

Las partículas de carburo de silicio se compactan y se queman a altas temperaturas para producir una fuerte forma cerámica. La gravedad específica del SiC es 3.2 g/cm^3. Posteriormente, la forma cerámica se pesa cuando está seca (360 g), después de sumergirla en agua (385 g) y mientras se encuentra suspendida en ella (224 g). Calcule la porosidad aparente, la porosidad verdadera y el porcentaje de volumen de poros cerrados.

SOLUCIÓN

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100 = \frac{385 - 360}{385 - 224} \times 100 = 15.5\%$$

$$\text{Densidad volumétrica} = B = \frac{W_d}{W_w - W_s} = \frac{360}{385 - 224} = 2.24 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Porosidad verdadera} = \frac{\rho - B}{\rho} \times 100 = \frac{3.2 - 2.24}{3.2} \times 100 = 30\%$$

El porcentaje de poros cerrados es la porosidad verdadera menos la porosidad aparente, o sea $30 - 15.5 = 14.5\%$. Entonces,

$$\text{Fracción de poros cerrados} = \frac{14.5}{30} = 0.48$$

15-5 Síntesis y procesamiento de los materiales cerámicos cristalinos

La figura 15-7 muestra el flujo de síntesis y procesamiento de los materiales cerámicos cristalinos. En términos generales, los pasos implican 1) la *formación* de un polvo cerámico, 2) el *moldeo* de la cerámica mediante la **compactación** y otros métodos, y 3) la *consolidación* de la cerámica por **sinterización** o **quemado**. A continuación analizaremos con mayor detalle cada uno de estos pasos.

Como se mencionó en el capítulo, los materiales cerámicos cristalinos se funden a altas temperaturas y presentan un comportamiento frágil a la tensión. En consecuencia, el moldeo y el procesamiento termomecánico, ampliamente utilizados para metales, aleaciones y termoplásticos, no pueden ser aplicados al procesar los materiales cerámicos ni las partes hechas de polvos cerámicos. Un **polvo** es un conjunto de partículas finas. Los polvos cerámicos se sintetizan mediante el triturado y molido de los componentes cerámicos para después separar las impurezas y mezclar varios polvos a fin de obtener la composición deseada. Una **lechada** de polvo (suspensión de polvo en un líquido) se esparce por medio de una boquilla a una cámara de aire caliente para formar aglomerados blandos en un proceso llamado secado por aspersión. Posteriormente, se da forma a los aglomerados mediante una variedad de procesos para formar una **cerámica verde**, la cual cuenta con la forma deseada pero debe ser densificada por medio de un tratamiento térmico de alta temperatura conocido como sinterizado o quemado. [En este paso se transforma la cerámica húmeda (material analizado en la sección 15-9) a formas de alfarería como vasos y tazones.] El material cerámico puede someterse a una serie de operaciones adicionales, como molido, pulido o maquinado, con base en la aplicación final que se le dará.

Existen varios procesos para moldear los polvos cerámicos y crear objetos útiles. A continuación analizaremos algunos de ellos.

Compactación

La compactación es el proceso mediante el cual se elimina la porosidad que existe entre los aglomerados al aplicar una carga. La figura 15-8 muestra los pasos de compactación uniaxial en el que se aplica una fuerza compactadora en una sola dirección. El proceso de compactación se puede completar en un minuto para piezas más pequeñas; entonces, la compactación uniaxial es adecuada para producir un gran número de piezas pequeñas y sencillas (< 6 pulgadas). Muchos materiales cerámicos electrónicos y magnéticos, herramientas de corte **cermet** (por ejemplo, WC-Co) y otros materiales se procesan usando esta técnica.

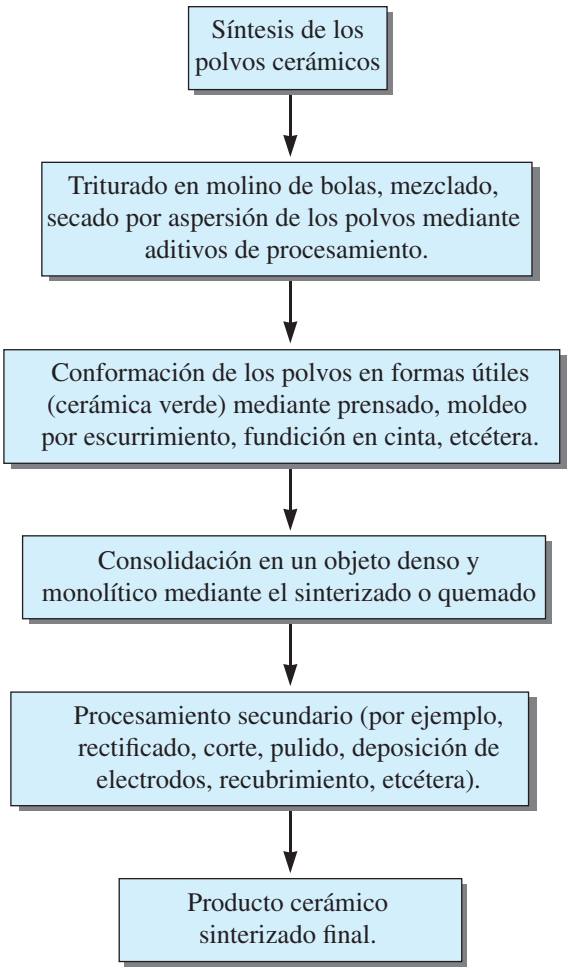


Figura 15-7 Pasos comunes del procesamiento de materiales cerámicos.

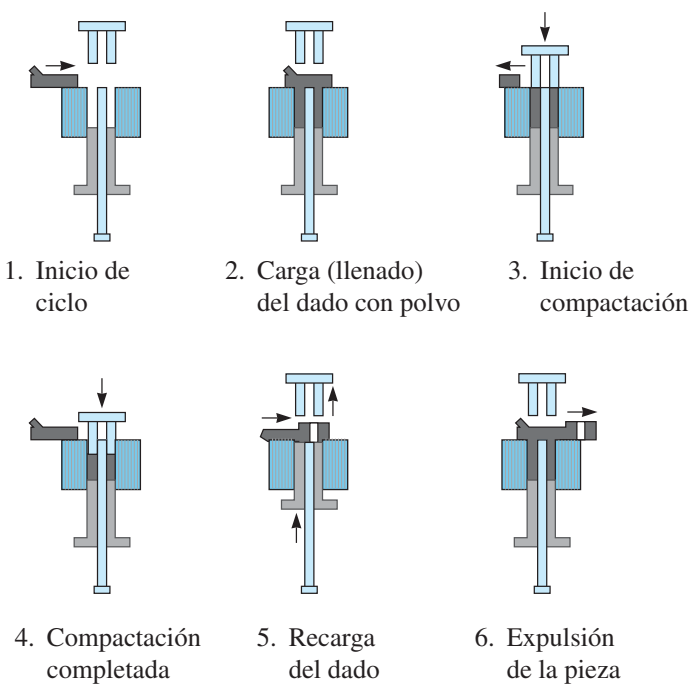


Figura 15-8 Compactación uniaxial de polvos que muestra el ensamble de troquel y dado a lo largo de diferentes etapas. Regularmente, en el caso de piezas pequeñas, estas etapas se completan en menos de un minuto. (*De* Materials and Processes in Manufacturing, *Eighth Edition, por E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Koshe, John Wiley & Sons, Inc., 1997.*)

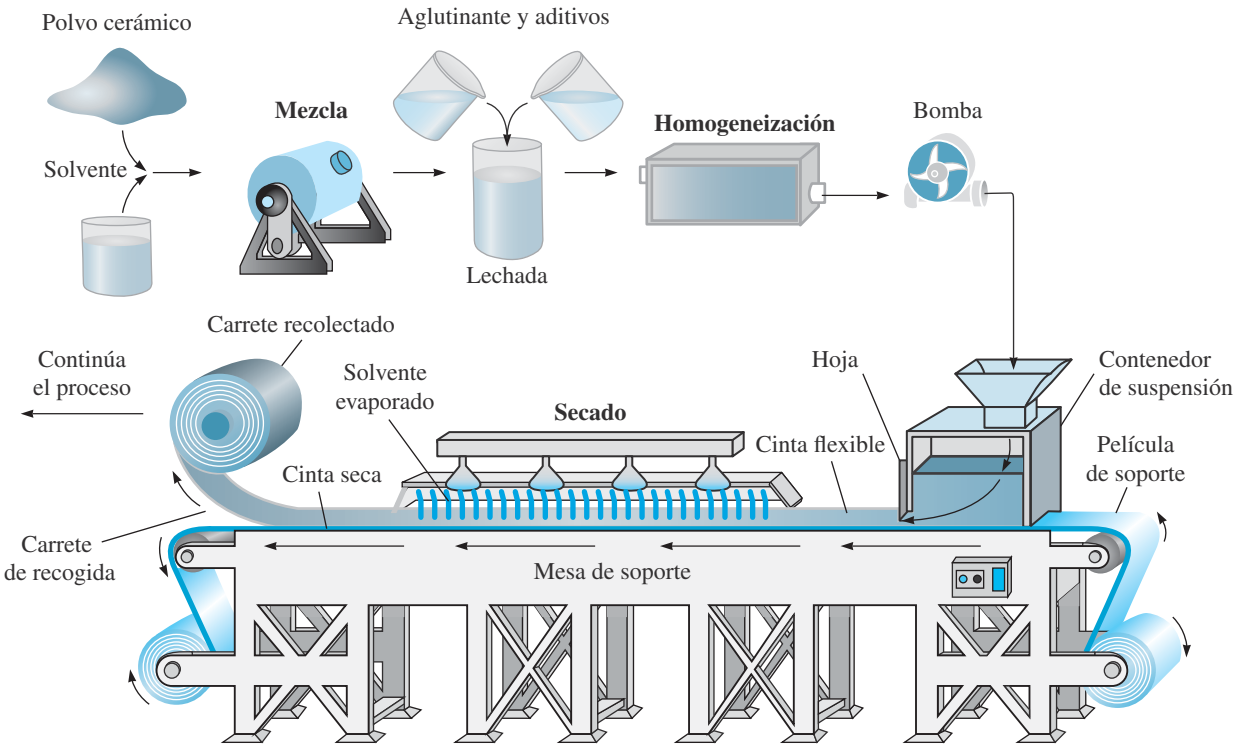


Figura 15-9 Etapas del proceso de fundición en cinta. (Basado en la *Enciclopedia Británica, Inc.*)

En algunos casos, piezas muy grandes (de hasta unos pocos pies de diámetro y de seis a ocho pies de largo) se pueden producir utilizando un proceso llamado **prensado isostático en frío (PIF)**, donde la presión se aplica usando aceite.

Fundición en cinta

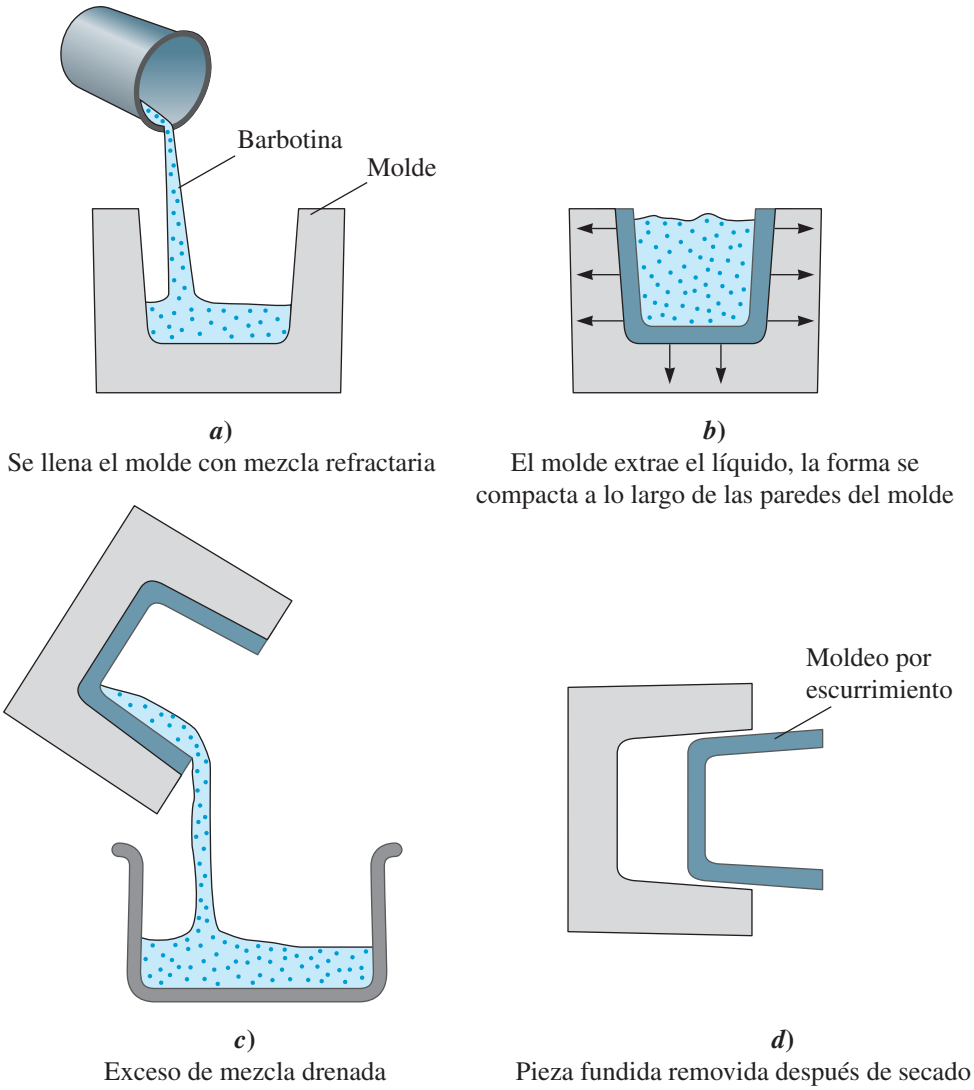
La técnica de **fundición en cinta** que se muestra en la figura 15-9 se usa para la producción de cintas cerámicas delgadas (~3 a 100 μm de espesor). Con ayuda de una hoja se deposita una lechada en un sustrato plástico. La cinta verde se somete entonces a sinterizado. Muchos paquetes electrónicos comercialmente importantes, basados en sustratos de alúmina, al igual que millones de capacitores de titanato de bario, se fabrican usando este tipo de proceso de fundición en cinta.

Moldeo por escurrimiento

Esta técnica usa una lechada acuosa de polvo cerámico. La lechada, conocida como barbotina, se vacía en un molde de yeso ($CaSO_4 : 2H_2O$) (figura 15-10). Conforme el agua de la lechada comienza a salir por acción capilar, se forma una masa gruesa a lo largo de la pared del molde. Cuando se ha acumulado suficiente espesor del producto, se vacía el resto de la lechada (esto recibe el nombre de *fundición por drenaje*). También es posible seguir vaciando más lechada en el molde para formar una pieza sólida (esto se conoce como *fundición sólida*). Del mismo modo, es posible usar presión para inyectar la lechada en moldes poliméricos. A continuación, la cerámica verde se seca y se "quema" o sinteriza a alta temperatura. El moldeo por escurrimiento se utiliza ampliamente para la manufactura de piezas de arte cerámico (figurillas y estatuas), lavaderos y otros muebles sanitarios de material cerámico.

Extrusión y moldeo por inyección

Estas técnicas son conocidas para fabricar tubos, ladrillos, tejas para horno y aislantes. El proceso de extrusión usa una mezcla viscosa, de textura similar a la masa para pan, de partículas cerámicas que contienen un aglutinante y otros aditivos [figura 15-11*a*)]. Esta mezcla tiene la consistencia de la arcilla, misma que luego se introduce en una máquina de extrusión donde se mezcla muy bien en un molino de amasar, se corta, se pasa por un desaerador y finalmente se inyecta en el dado de una máquina de extrusión, de la cual se obtiene una forma continua de cerámica verde. Esta forma se corta en longitudes apropiadas y después se seca y sinteriza. Las piezas de cerámica cordierita (componentes que contienen Mg, Fe, Al, Si y O),



a)
Se llena el molde con mezcla refractaria

b)
El molde extrae el líquido, la forma se compacta a lo largo de las paredes del molde

c)
Exceso de mezcla drenada

d)
Pieza fundida removida después de secado parcial

Figura 15-10 Pasos en moldeo por escurrimiento de cerámicas. (*De* Modern Ceramic Engineering, *por D.W. Richerson, David W., Taylor & Francis, 1992.*)

que se usan en la fabricación de las estructuras en forma de panal de los convertidores catalíticos, también se elaboran utilizando el proceso de extrusión. El moldeo por inyección [figura 15-11*b*)] de los materiales cerámicos es similar al moldeo por inyección de polímeros (capítulo 16). La extrusión se utiliza para formas simples con intersecciones constantes, mientras que la inyección se emplea en el modelamiento de formas complejas. En el proceso de moldeo por inyección los polvos cerámicos se mezclan con un plastificante termoplástico y otros aditivos. Esta mezcla se pasa a continuación por un extrusor y se inyecta en un dado para formar cerámica verde. El polímero existente en el material cerámico moldeado por inyección se elimina por calor (quemado), y lo que queda del cuerpo cerámico se sinteriza a alta temperatura.

Sinterizado Después de la formación de una cerámica verde, las partículas de polvo de cerámica están en contacto directo entre sí, pero no están enlazadas. Las partículas se enlazan entre sí en los puntos de contacto durante un tratamiento térmico de alta temperatura conocido como sinterización. La fuerza impulsora para este proceso es la reducción del área superficial del polvo, ya que las superficies, con enlaces colgantes, son regiones de alta energía del material. Los átomos o iones se difunden a lo largo de los límites de grano y se abultan (difusión por volumen) en las regiones de contacto (conocidas como cuellos) entre las partículas. Esto provoca que disminuya el tamaño de los poros entre las partículas, lo que conduce a la densificación del material. Los átomos o iones también

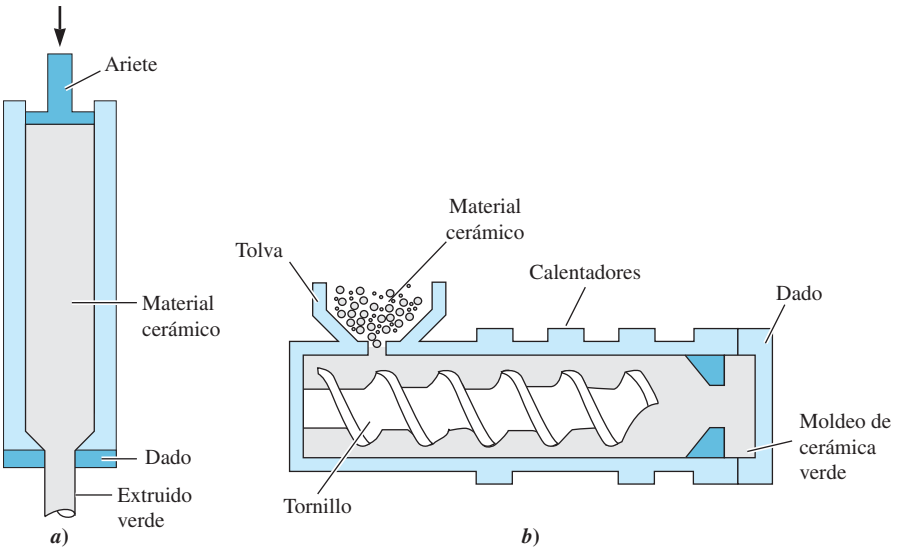


Figura 15-11 *a*) Extrusión y *b*) moldeo por inyección.

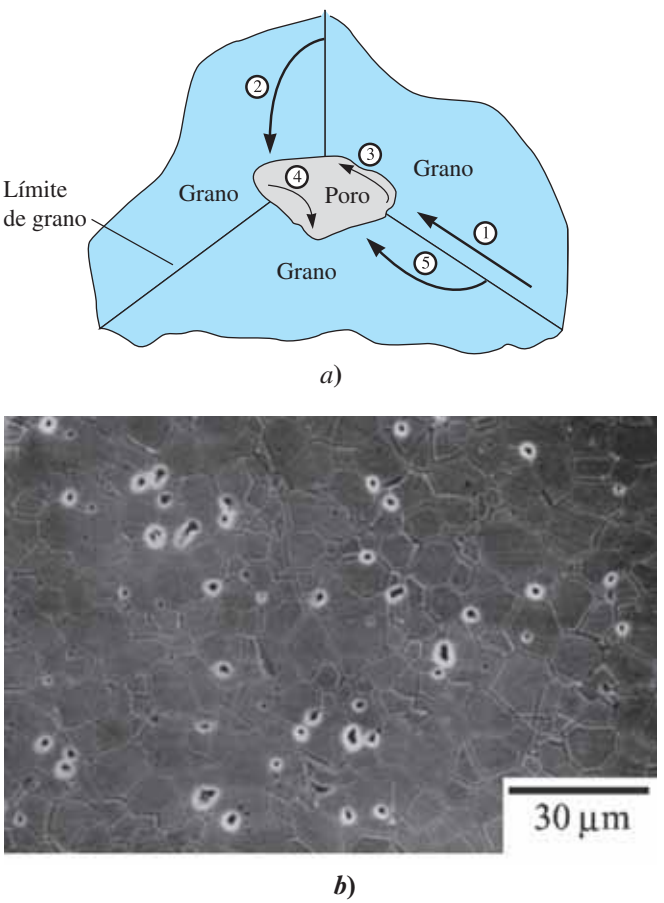


Figura 15-12 *a*) Diferentes mecanismos de difusión comprendidos en la sinterización. El límite de grano y la difusión volumétrica (1, 2 y 5) hacia el cuello contribuyen a la densificación. La evaporación-condensación (4) y la difusión de superficie (3) no contribuyen a la densificación. (*De* Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering, *por Y.M. Chiang, D. Birnie y W.D. Kingery, John Wiley & Sons, Inc. 1997.*) *b*) Polvo compacto de Al_2O_3 parcialmente sinterizado. Los poros aislados son visibles. (*Reimpreso de* Sintering: Densification, Grain Growth, and Microstructure, *Suk-Joong L. Kang, Capítulo 1: Sintering Processes, pp. 3-8, Copyright (2005), con autorización de Elsevier.*)

pueden evaporarse desde la superficie del poro y condensarse en ella, y los átomos o iones pueden difundirse a lo largo de las superficies de los poros. Estos dos últimos mecanismos no contribuyen a la contracción de los poros ni a la densificación del material [figura 15-12*a*)]. La sinterización también se analizó en la sección 5-9.

Aunque la sinterización puede llevarse a cabo sin la aplicación de presión, ésta se aplica con frecuencia para la sinterización de los materiales cerámicos. Esta técnica, conocida como **prensado en caliente**, se utiliza para la cerámicas refractarias y con enlaces covalentes que no muestran un buen comportamiento de sinterización sin presión. Del mismo modo, las piezas grandes de metales y aleaciones compactadas usando PIF se pueden sinterizar bajo presión hidrostática en un proceso conocido como **prensado isostático en caliente** (PIC). En el prensado en caliente, o PIC, la presión aplicada actúa en contra de la presión de poro interno y mejora la densificación sin provocar el crecimiento del grano. El prensado isostático en caliente y el prensado en caliente se utilizan también para la fabricación de cerámicas y de partes metálicas con casi ninguna porosidad. Se han desarrollado algunos procesos innovadores con microondas para el secado y sinterización de los materiales cerámicos (similares a la forma en que se calientan los alimentos en los hornos de microondas).

Con frecuencia, el tamaño promedio del grano está íntimamente relacionado con el tamaño de la partícula primaria. Una excepción es cuando se presenta el crecimiento de grano debido a largos tiempos de sinterizado o a un **crecimiento exagerado o anormal del grano**. Por lo general, los productos cerámicos con pequeño tamaño de grano son más fuertes que los de grano grueso. Tamaños más finos de grano ayudan a reducir los esfuerzos que se desarrollan en los límites de grano debido a expansión y contracción anisotrópicas. En general, partiendo de materias primas cerámicas más finas se produce un tamaño más fino de grano. Las propiedades magnéticas, dieléctricas y ópticas de los materiales cerámicos dependen del tamaño promedio del grano y, en esas aplicaciones, el tamaño del grano debe controlarse de manera adecuada. Aunque esto no se analizará aquí con más detalle, en ciertas aplicaciones es importante usar cristales individuales de materiales cerámicos para evitar los nocivos límites de grano que están siempre presentes en los materiales cerámicos policristalinos.

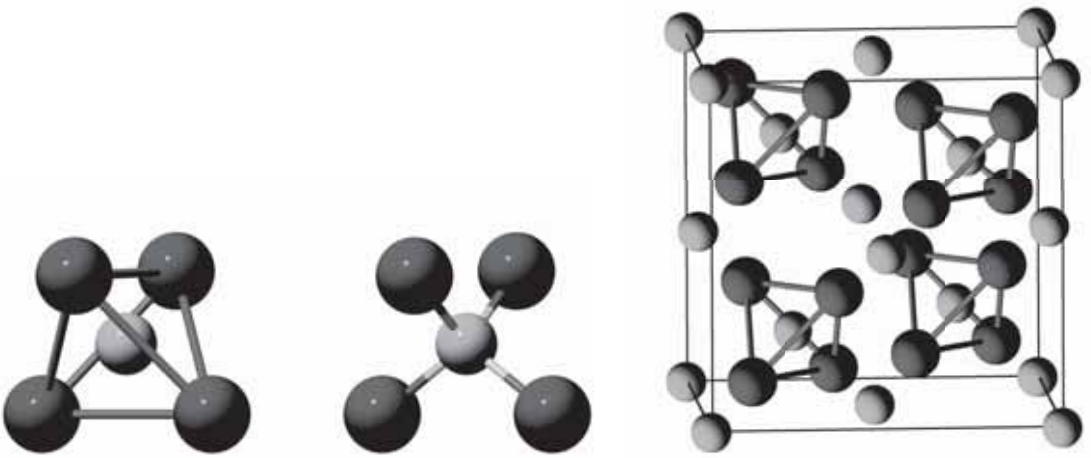
15-6 Sílice y silicatos compuestos

El dióxido de silicio, o sílice, es bien conocido en la forma de cuarzo. Este mineral cristalino abunda en la naturaleza, forma gran parte de la corteza terrestre y es el material predominante en la arena. La sílice también existe como un material amorfo que es el componente principal del vidrio arquitectónico. A pesar de estas familiaridades y de su sencilla fórmula molecular (SiO_2), la sílice y los compuestos a base de sílice, o "silicatos", existen en múltiples formas que pueden presentar complejidades estructurales o de comportamiento extraordinarias. Algunos miembros de esta extensa familia de materiales encuentran aplicaciones comerciales a gran escala, mientras que otros forman la base para una variedad de piedras semipreciosas; otros son muy raros y se pueden crear sólo en condiciones extremas de presión o temperatura, o ambos.

Existen compuestos de sílice y silicatos en numerosas formas estructurales, conocidos como polimorfos (sección 4-3). El constituyente común de estos materiales es una unidad molecular de SiO_4 que tiene un átomo de silicio centrado en un tetraedro de átomos de oxígeno, como se muestra en la figura de 15-13*a*). Una sola unidad tendría un anión de carga -4, pero la sílice y los silicatos, tanto cristalinos como amorfos, están compuestos de una red extendida de estas unidades tetraédricas con carga neutra, sin importar si cuentan con especies catiónicas o no.

Las formas más simples de sílice puro comparten los átomos de oxígeno en cada esquina de cada unidad tetraédrica con dos tetraedros adyacentes, proporcionando la estequiometría requerida del SiO_2. Incluso en esta disposición compartida, donde cada oxígeno funge como "puente" entre dos tetraedros, se encuentra una serie de polimorfos estructuralmente distintos, incluyendo los minerales cristalinos de tridimita, cristobalita y cuarzo, cada uno de los cuales son estables dentro de varios rangos de temperatura. Estos minerales, a su vez, pueden presentar una variedad de estructuras cristalográficas; por ejemplo, la tridimita cuenta con por lo menos siete variantes cristalinas diferentes.

Cuando se consideran las estructuras cristalinas complejas de los silicatos, es útil pensar en la unidad tetraédrica molecular $(SiO_4)^{4-}$ como átomos individuales debido a su gran estabilidad. Posteriormente, debemos considerar a los tetraedros, apilados o dispuestos de alguna manera repe-



a) *b*)

Figura 15-13 *a*) Dos vistas de la unidad tetraédrica SiO_4^{4-}. A la izquierda, la caja tetraédrica de átomos de oxígeno (en gris oscuro) que rodea al átomo de silicio (en gris claro). A la derecha se ilustran los enlaces de O. *b*) Celda unitaria de la cristobalita β con cuatro unidades tetraédricas SiO_4.

titiva y formando un cristal. Por ejemplo, una forma de cristobalita, conocida como cristobalita β, puede ser modelada como tetraedros de $(SiO_4)^{4-}$ que ocupan las mismas posiciones que los átomos de carbono individuales en la estructura cúbica del diamante. Es por ello que la cristobalita β también puede visualizarse como átomos de silicio que ocupan sus posiciones "normales" en el silicio cristalino, con la estructura cúbica del diamante y con un solo átomo de oxígeno situado a la mitad de la distancia que existe entre cada par de átomos de silicio. Recuerde que cuando encontramos átomos de silicio en las posiciones de base (0, 0, 0) y (1/4, 1/4, 1/4) de una red CCCa, encontraremos átomos de oxígeno en (1/8, 1/8, 1/8) y en posiciones equivalentes. Esta estructura se ilustra en la figura 15-13*b*).

Además de compartir las esquinas, los tetraedros SiO_4 puede compartir los bordes, o caras, creando nuevos constituyentes que a su vez se arreglarán de forma repetida. Por ejemplo, dos tetraedros que comparten un solo borde forman una unidad con estequiometría de SiO_3 que puede presentar varias configuraciones como las de dos tetraedros que giran alrededor de su borde común. Además, estos constituyentes pueden formar largas cadenas, anillos y hojas que al combinarse con elementos adicionales comprenden uno de los varios miles de materiales del silicato. El granate, por ejemplo, que se confunde a menudo con un solo material, es una clase de silicato con fórmula general de $A_3B_2(SiO_4)_3$, donde las especies tipo A son generalmente cationes de calcio, magnesio, hierro o de manganeso bivalentes (+2) y las especies B son cationes de aluminio, hierro o cromo trivalente (+3).

La mica, un vidrio de silicato, es otro ejemplo de las muchas estructuras de hoja que demuestra uno de los principios de la ciencia de materiales: que la estructura y las propiedades están estrechamente relacionadas. Las micas, o silicatos micáceos, cuentan con una estructura con enlace sólido entre sus distintos constituyentes en comparación con el enlace entre sus hojas. Como resultado, muchos silicatos micáceos muestran fracturas altamente preferenciales a lo largo de un plano específico. Esto es similar a la fractura fácil que ocurre dentro del carbono puro en forma de grafito, a pesar de que las micas cuentan con una estructura mucho más compleja. En una familia de micas encontramos la fórmula general de $A_3B_4C_8O_{20}$ $(OH, F)_4$ en la que las especies de tipo A pueden ser de potasio, sodio o calcio, las tipo B pueden ser de aluminio, magnesio o hierro y las C de silicio o aluminio. Con todas las posibilidades químicas y configuracionales, es fácil entender por qué la familia de los silicatos es tan vasta.

Como ya se mencionó, existen materiales a base de sílice en formas cristalinas y amorfas. El uso del término "cristal" o "vítreo" para indicar cualquier material amorfo deriva del hecho de que los vidrios convencionales, como las ventanas o las botellas, son todos amorfos. Por supuesto, los usos arquitectónicos y artísticos de los vidrios de silicato se deben a su transparencia. Los vidrios de "sosa y cal" son la forma más común de vidrios estructurales. La "sosa" se refiere al carbonato

de sodio como material empleado para fabricar vidrio, e incorpora diversas cantidades de silicio, oxígeno, sodio, calcio, aluminio y otros elementos en cantidades muy pequeñas.

Al variar la composición y el procesamiento se obtienen vidrios con diferentes propiedades ópticas y mecánicas. Por ejemplo, los vidrios de botella verde incluyen óxidos de hierro. Los **vidrios templados** reciben un tratamiento térmico o químico para incrementar la resistencia de las placas de vidrio convencional de ventanas y botellas. Pyrex® es una marca comercial de vidrio que contiene boro y se emplea en utensilios de cocina y en la fabricación de lentes para telescopios debido a su bajo coeficiente de expansión térmica. Los materiales a base de sílice se usan como aislantes térmicos, refractarios, abrasivos, y como fibras en compuestos reforzados con fibra y vidrios de laboratorio. El transbordador espacial usó ~25,000 losetas de cerámica reusables, ligeras y altamente porosas para proteger su estructura de aluminio del calor generado durante el reingreso a la atmósfera terrestre. Estas losetas se hicieron de fibras de sílice de alta pureza con sílice coloidal recubierto con un vidrio de borosilicato. Los polvos de partículas finas de sílice se usan en neumáticos, pinturas y muchas otras aplicaciones.

La sílice también es el corazón de varias clases de productos de alta tecnología. Los sistemas de comunicaciones ópticas se basan en delgadas fibras de vidrio de sílice que ofrecen velocidades de transmisión de datos casi ilimitadas en comparación con los cables convencionales de alambre de cobre. Las superficies de muchos dispositivos "táctiles", como los smartphones, usan vidrios endurecidos altamente resistentes a la fractura. Los componentes microelectrónicos de silicio (como circuitos integrados o "chips") se basan en las propiedades eléctricas específicas de las capas ultrafinas de dióxido de silicio amorfo, algunas de las cuales sólo ocupan algunas capas atómicas de espesor.

15-7 Vidrios inorgánicos

En esta sección nos enfocaremos en los vidrios inorgánicos. Existen vidrios basados en sulfuros, fluoruros y otras aleaciones diversas, pero los basados en sílice son los que más se usan. Un **vidrio** es un material metaestable que se ha endurecido y se ha hecho rígido sin cristalizar. Existen muchos factores que permiten que los vidrios omitan la cristalización, pero el más importante es la combinación de una difusión de átomos o iones limitada con una tasa de enfriamiento suficientemente rápida. Las altas viscosidades reflejan la cinética lenta de los líquidos formadores de vidrio.

La figura 15-14 muestra un diagrama de la densidad de un material cristalino y amorfo en función de la temperatura. Una fase cristalina forma el líquido a temperatura de fusión (como se

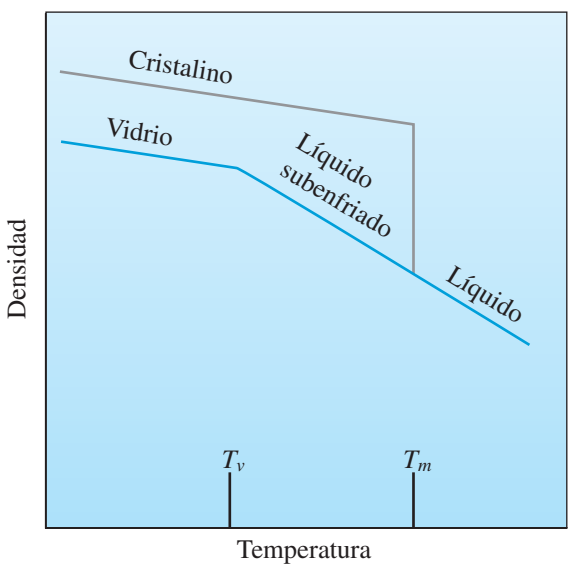


Figura 15-14 Cuando la sílice se cristaliza al enfriarse, se observa un cambio abrupto en su densidad. Sin embargo, en la sílice vidriosa el cambio en la pendiente en la temperatura de transición vítrea indica la formación de un vidrio a partir del líquido subenfriado. El vidrio no tiene T_m o T_v fijas. Los materiales cristalinos tienen una T_m fija y no tienen T_v.

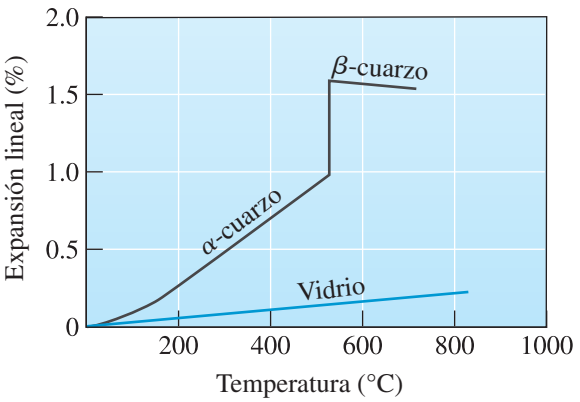


Figura 15-15 El coeficiente de expansión térmica de la sílice fundida (sílice amorfa) es menor que el del cuarzo cristalizado. La discontinuidad en la curva del cuarzo cristalino se presenta en una transición de fase α-β. La solidificación del cuarzo solidificado al cuarzo β y los polimorfos vítreos no se muestran en esta figura.

describe en el capítulo 9), generando un cambio abrupto en la densidad. Por el contrario, un vidrio que se forma de la misma masa fundida no muestra un cambio en la pendiente de la curva de densidad a la temperatura de fusión. La temperatura crítica en la formación de vidrio se conoce como **temperatura de transición vítrea** T_v. Podemos pensar en el material como un líquido supercongelado hasta que alcanza la temperatura de transición vítrea en el enfriamiento. Al llegar a esta temperatura, el material se considera como vidrio y no como un líquido supercongelado. Se observa un cambio de pendiente en la densidad en relación con la temperatura, pero no hay discontinuidad. Tenga en cuenta que la temperatura de transición vítrea no es una temperatura fija, ya que depende de la composición y la velocidad de enfriamiento.

La figura 15-15 es una gráfica del coeficiente de dilatación térmica lineal de los tres polimorfos de sílice pura como una función de la temperatura. Se presentan dos formas cristalinas: cuarzo β y cuarzo α, así como la forma vítrea conocida como sílice fundida o vítrea. Al enfriar altas temperaturas a tasas de enfriamiento bajas, el líquido fundido se cristaliza primero como cuarzo β. A una temperatura de 573°C, el cuarzo β se transforma en un cuarzo α. La discontinuidad en el valor del coeficiente de expansión térmica refleja las diferentes estructuras cristalinas de los cuarzos α y β. En contraste, cuando la masa fundida se enfría a una velocidad mayor que la velocidad de enfriamiento crítica, se forma un vidrio sólido. No hay ninguna transición brusca en el coeficiente de expansión térmica porque no hay cambios abruptos en la estructura. El coeficiente de expansión térmica de la sílice vítrea es menor que la de los cuarzos α y β, debido a que su estructura relativamente abierta le permite adaptarse a la energía térmica por la rotación de las unidades tetraédricas, en lugar de aumentar la longitud del enlace.

La sílice es conocida como un **formador de vidrio**, es decir, produce fácilmente una fase amorfa durante el procesamiento. Otros formadores de vidrio incluyen B_2O_3, GeO_2 y P_2O_5. En general, los vidrios de silicato contienen óxidos adicionales (tabla 15-5). Los óxidos que se agregan pueden ser clasificados como productos **intermedios** o **modificadores**. Los óxidos intermedios (como el óxido de aluminio) no forman vidrios por sí mismos, pero se incorporan en la estructura de los formadores

Tabla 15-5 División de los óxidos en formadores, intermedios y modificadores de vidrio

Formadores de vidrio	Intermedios	Modificadores
B_2O_3	TiO_2	Y_2O_3
SiO_2	ZnO	MgO
GeO_2	PbO_2	CaO
P_2O_5	Al_2O_3	PbO
V_2O_3	BeO	Na_2O

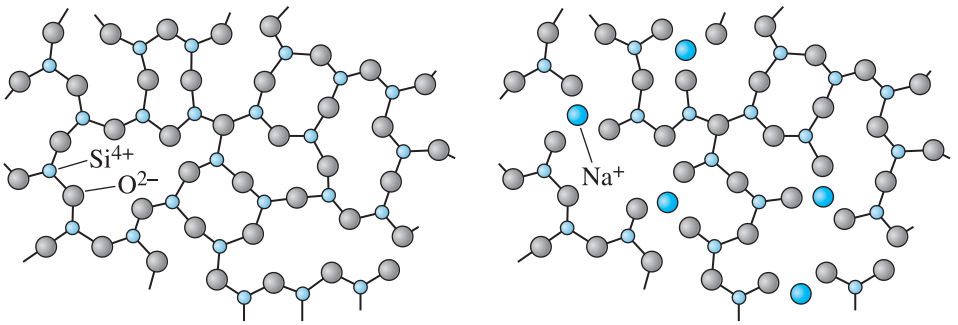


Figura 15-16 Efecto del Na_2O sobre la red del vidrio de sílice. El óxido de sodio es un modificador que altera la red vítrea y reduce la capacidad de formación de vidrios.

de vidrio; por lo tanto, el material es todavía amorfo al enfriarse a pesar de la adición de los compuestos intermedios. Los compuestos intermedios tienden a incrementar la resistencia del vidrio al choque térmico mediante el incremento de la cantidad de volumen libre entre los átomos (o el espacio vacío en la estructura de red), por lo que los enlaces se acomodan con mayor facilidad y rapidez al cambio dimensional. A medida que se añaden los óxidos conocidos como modificadores, éstos rompen la estructura de la sílice de los formadores de vidrio y, finalmente, hacen que el vidrio se **desvitrifique** (se cristalice). Al hacerlo, los modificadores reducen el punto de fusión y la viscosidad del vidrio facilitando su procesamiento. Esta modificación puede entenderse considerando la relación O:Si. Para la sílice pura, esta relación es 2:1. Cuando se le añade Na_2O como modificador, los iones de sodio entran en las vacantes de la red en lugar de formar parte de ella, mientras que el ion de oxígeno se convierte en parte de la red (figura 15-16). Cuando esto sucede, no hay suficientes iones de silicio para combinarse con los iones adicionales de oxígeno y mantener intacta la red. Finalmente, una relación alta de O:Si hace que los tetraedros de sílice restante formen cadenas, anillos o compuestos, y de esta manera ya no se transforma en vidrio. Cuando la relación de O:Si es superior a aproximadamente 2.5, es difícil que se forme el vidrio de sílice. Cuando la proporción supera tres, se forma un cristal sólo cuando se toman medidas especiales, como el uso de tasas de enfriamiento rápido. Como se puede ver en la figura 15-17, la adición de Na_2O produce eutécticos con muy bajas temperaturas de fusión. Si se añade CaO se reduce la solubilidad del vidrio en el agua, mejorando así su estabilidad química y modificando aún más el vidrio. El siguiente ejemplo muestra cómo diseñar un vidrio.

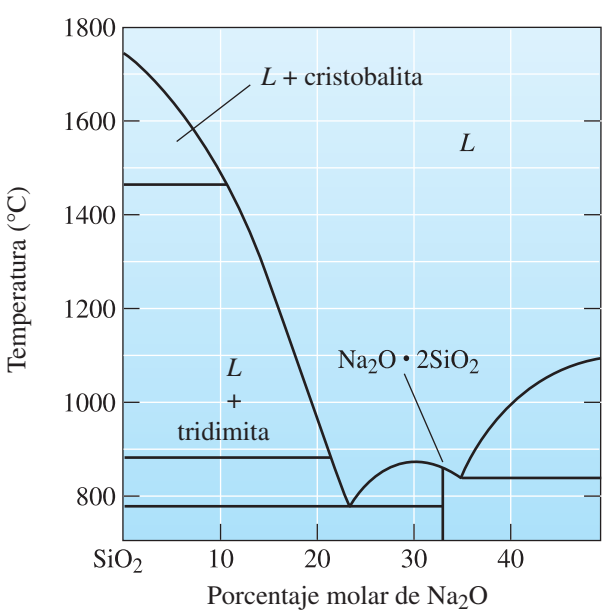


Figura 15-17 Diagrama de fases de SiO_2-Na_2O. Las adiciones de sosa (Na_2O) a la sílice reducen considerablemente la temperatura de fusión de la sílice al formar eutécticos.

Ejemplo 15-2 *Diseño de un vidrio*

Se produce buena resistencia química en un vidrio cuando se introduce B_2O_3 en sílice. Para asegurar que haya buenas características para formación de vidrio, se desea que la relación O:Si sea no mayor de 2.5, pero también se desea que el vidrio tenga una baja temperatura de fusión para hacer que el proceso de formación de vidrio sea más fácil y económico. Diseñe este vidrio.

SOLUCIÓN

Como el B_2O_3 reduce la temperatura de fusión de la sílice, se desea agregar el máximo posible. Sin embargo, también es necesario asegurar que la relación O:Si no sea superior a 2.5, porque de esta forma se limita la cantidad de B_2O_3. Como ejemplo, hay que determinar cuánto B_2O_3 debe añadirse para obtener una relación O:Si de exactamente 2.5. Si f_B es la fracción molar de B_2O_3 que se agrega al vidrio y $(1 - f_B)$ es la fracción molar de SiO_2:

$$\frac{O}{Si} = \frac{\left(3\ \frac{\text{iones O}}{B_2O_3}\right)(f_B) + \left(2\ \frac{\text{iones O}}{SiO_2}\right)(1 - f_B)}{\left(1\ \frac{\text{ion Si}}{SiO_2}\right)(1 - f_B)} = 2.5$$

$$3f_B + 2 - 2f_B = 2.5 - 2.5f_B \quad \text{o} \quad f_B = 0.143$$

Por lo tanto, se debe producir un vidrio que no contenga más de 14.3 mol% B_2O_3. En porcentaje en peso:

$$\%\ \text{en peso de } B_2O_3 = \frac{(f_B)(69.62\ \text{g/mol})}{(f_B)(69.62\ \text{g/mol}) + (1 - f_B)(60.08\ \text{g/mol})} \times 100$$

$$\%\ \text{en peso de } B_2O_3 = \frac{(0.143)(69.62\ \text{g/mol})}{(0.143)(69.62\ \text{g/mol}) + (0.857)(60.08\ \text{g/mol})} \times 100 = 16.2$$

Los vidrios se fabrican a alta temperatura y con viscosidad controlada a fin de que puedan conformarse sin romperse para producir artículos de gran utilidad. La figura 15-18 ayuda a comprender el proceso en función de los grados de viscosidad.

1. *Grado líquido*. Se produce vidrio en placa y en hoja cuando se encuentra en estado líquido, es decir, fundido. Las técnicas incluyen el laminado del vidrio fundido pasándolo a través de rodillos enfriados por agua o flotando el vidrio fundido sobre una tina de estaño fundido (figura 15-19). El proceso de estaño líquido produce en el vidrio una superficie excepcionalmente lisa. El desarrollo del proceso de vidrio flotado fue un genuino adelanto en el procesamiento de los vidrios. La composición básica del vidrio flotado se ha mantenido sin modificaciones esenciales durante muchos años (tabla 15-6).

   Algunas formas de vidrio, entre las que se encuentran los grandes espejos ópticos, se producen vaciando el vidrio fundido en un molde y después asegurando un enfriamiento tan lento como sea posible para reducir al mínimo los esfuerzos residuales y evitar que se rompa la pieza. Se pueden producir fibras de vidrio estirando el vidrio líquido a través de pequeñas aberturas hechas en un dado de platino (figura 15-20). Por lo general, con un solo dado se puede producir de forma simultánea una gran cantidad de fibras.

2. *Escala de trabajo*. Formas como las de recipientes y focos pueden conformarse por presión, por estirado o soplando el vidrio en moldes (figura 15-20). Se puede preformar un *grumo* de vidrio líquido en una forma burda (parisón) y a continuación moldearla o soplarla en un molde caliente para producir la forma final. El vidrio se calienta a una temperatura dentro de una escala de trabajo, de manera que pueda ser maleable, pero que no se "corra".

3. *Escala del recocido*. Algunos componentes cerámicos se recuecen para eliminar los esfuerzos residuales durante el conformado. Por ejemplo, se recuecen grandes piezas de vidrio vaciado y se dejan enfriar lentamente para evitar que se agrieten. Algunos vidrios pueden ser tratados

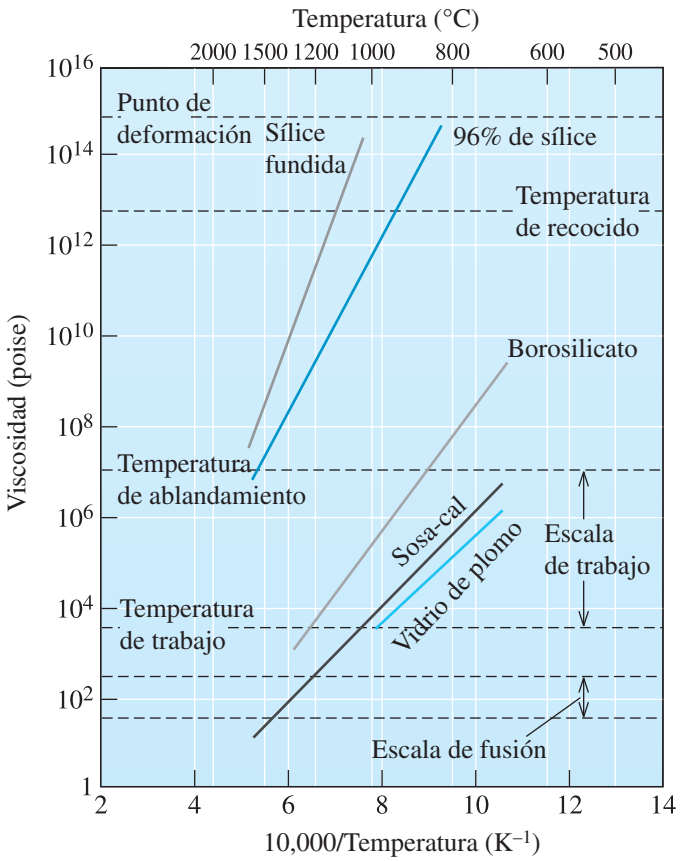


Figura 15-18 Efecto de la temperatura y de la composición en la viscosidad del vidrio.

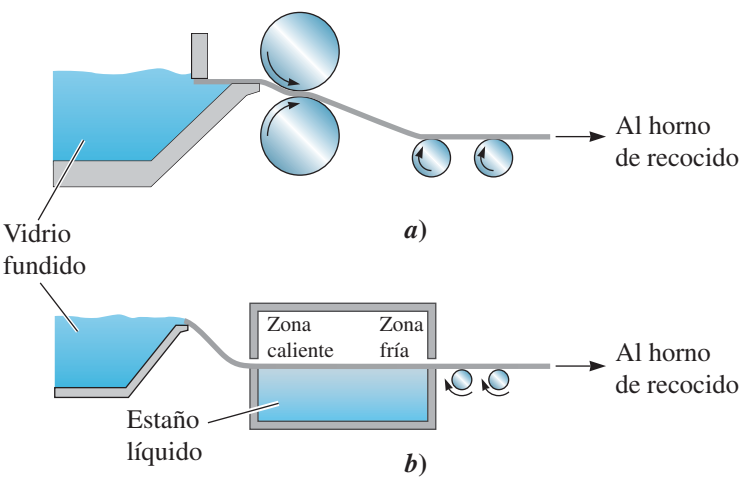


Figura 15-19 Técnicas de fabricación de vidrio en hoja y en placa: *a*) laminado y *b*) flotado del vidrio sobre estaño fundido.

térmicamente a fin de provocar devitrificación, es decir, la precipitación de una fase cristalina a partir del vidrio.

El vidrio templado se produce al templar con aire la superficie de vidrio en placas, provocando que las capas superficiales se enfríen y se contraigan. Cuando el centro se enfría, su contracción es restringida por la superficie ya rígida, que se pone en compresión (figura 15-21). Cuando falla el vidrio templado, se rompe en pequeñas piezas redondas (a diferencia del vidrio sin templar, que se rompe en fragmentos filosos). Es por ello que se usa en ventanas de automóviles y casas, estantes para refrigeradores, hornos, muebles y muchas otras aplicaciones en las cuales la seguridad es importante. El vidrio laminado, formado por dos hojas de vidrio recocido con un separador de polímero (por ejemplo butiralpolivinilo o PVB), se usa para fabricar parabrisas de automóvil.

Tabla 15-6 Composición de vidrios comunes (en porcentaje en peso)

Vidrio	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	B_2O_3	MgO	PbO	Otros
Sílice fundida	99							
Vycor[MR]	96				4			
Pyrex[MR]	81	2		4	12			
Frascos de vidrio	74	1	5	15		4		
Vidrio para ventanas	72	1	10	14		2		
Placa de vidrio/vidrio flotado	73	1	13	13				
Focos	74	1	5	16		4		
Fibras	54	14	16		10	4		
Termómetros	73	6		10	10			
Vidrio de plomo	67			6			17	10% K_2O
Cristal óptico	50			1			19	13% BaO, 8% K_2O, ZnO
Corona óptica	70			8		10		2% BaO, 8% K_2O
Fibras de vidrio E	55	15	20		10			
Fibras de vidrio S	65	25				10		

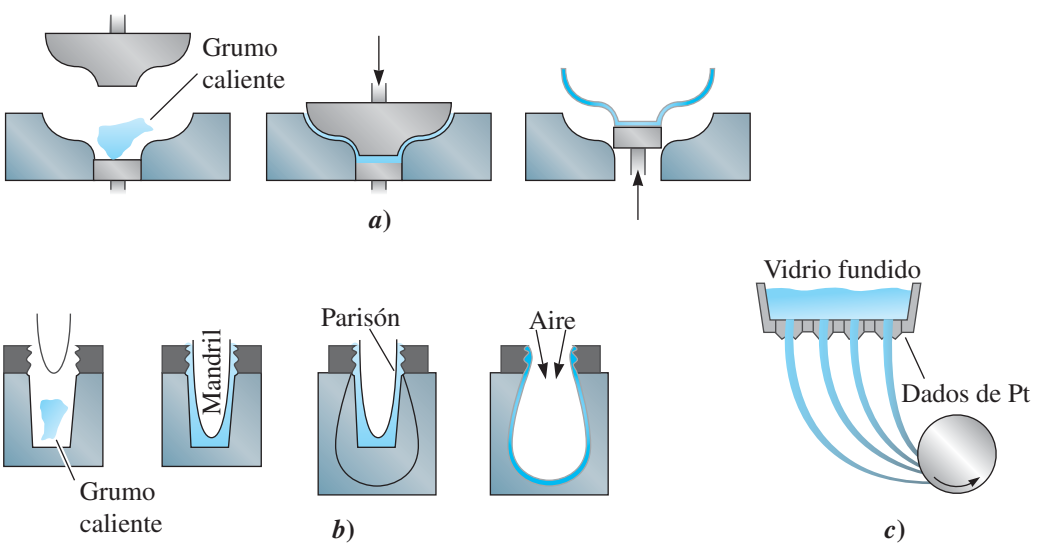


Figura 15-20 Técnicas para formar productos de vidrio: *a*) a presión, *b*) proceso de prensado y soplado, y *c*) estirado de fibras.

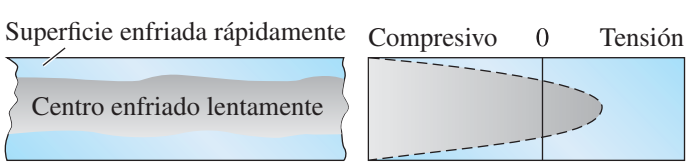


Figura 15-21 El vidrio templado se enfría rápidamente para producir esfuerzos residuales de compresión en la superficie.

Composiciones de vidrios

El SiO_2 puro debe calentarse a temperaturas muy altas para lograr viscosidades que permitan un conformado económico. La mayoría de los vidrios comerciales se basan en modificadores de sílice, como la sosa (Na_2O) para disgregar la estructura de red y formar eutécticos de bajas temperaturas de fusión, en tanto que se añade cal (CaO) para reducir la solubilidad del vidrio en el agua. El vidrio comercial más común contiene aproximadamente 75% de SiO_2, 15% de Na_2O y 10% de CaO, y se conoce como vidrio de sosa-cal.

Los vidrios de borosilicato, que contienen cerca de 15% de B_2O_3, tienen excelente estabilidad química y dimensional. Sus usos incluyen productos de vidrio para laboratorio (Pyrex^{MR}), así como recipientes para el desecho de desperdicios nucleares de alto nivel radiactivo. El vidrio de borosilicato de calcio y aluminio, o vidrio E, se emplea como fibra de uso general para materiales compuestos, por ejemplo la fibra de vidrio. Los vidrios de aluminosilicato, con 20% de Al_2O_3 y 12% de MgO, y los vidrios de alto sílice, con 3% de B_2O_3, son excelentes para resistir altas temperaturas y como protección contra impactos eléctricos o térmicos. El vidrio S, un aluminosilicato de magnesio, se usa para producir fibras de alta resistencia para materiales compuestos. La sílice fundida, o SiO_2, prácticamente pura, es la que presenta mejor resistencia a altas temperaturas, al impacto térmico y al ataque químico, aunque también resulta costosa.

También se pueden obtener cualidades ópticas especiales, incluyendo sensibilidad a la luz. Los vidrios fotocromáticos, que se oscurecen ante la porción ultravioleta de la luz solar, se usan en anteojos. El vidrio fotosensible se oscurece de manera permanente al ser expuesto a la luz ultravioleta; si sólo se exponen porciones seleccionadas del vidrio y después se sumergen en ácido hidrofluorídrico, se pueden producir grabados. Los vidrios policromáticos son sensibles a todo tipo de luz, no sólo a radiaciones ultravioleta. Del mismo modo, en los vidrios de silicato se forman núcleos de cristales minúsculos de semiconductores, como el sulfuro de cadmio (CdS), en un proceso conocido como *opacar*. Estos vidrios presentan colores brillantes y también tienen propiedades ópticas útiles.

15-8 Vidrios-cerámicos

Los **vidrios-cerámicos** son materiales cristalinos derivados de los vidrios amorfos. Por lo general tienen un nivel considerable de cristalinidad (~70–99%). Con los vidrios-cerámicos se puede aprovechar su conformabilidad y densidad. Se puede obtener un resultado de muy baja porosidad produciendo una forma mediante técnicas convencionales de conformación, por ejemplo prensado o soplado.

El primer paso para la producción de un vidrio-cerámico es asegurarse de que no ocurra cristalización durante el enfriamiento a partir de la temperatura de conformado. Para los vidrios basados en silicatos se puede estudiar un diagrama de transformación de enfriamiento continuo e isotérmico, muy parecido a los diagramas TEC y TTT para los aceros. La figura 15-22*a*) muestra un diagrama TTT para un vidrio. Si el vidrio se enfría con demasiada lentitud, se cruzará una línea de transformación; la formación de núcleos y el crecimiento de los cristales se iniciarán, aunque de forma no controlada. La adición de óxidos modificadores al vidrio, algo muy parecido a agregar elementos de aleación al acero, traslada la curva de transformación hacia tiempos más extendidos y evita la devitrificación, incluso a tasas de enfriamiento reducidas. Como se hizo notar en capítulos anteriores, estrictamente hablando, para este análisis se deberían utilizar diagramas TEC y no TTT.

La formación de núcleos de la fase cristalina se controla de dos maneras. En la primera, el vidrio contiene agentes como el TiO_2 que reaccionan con otros óxidos y forman fases que proporcionan sitios para la formación de núcleos. En la segunda, se diseña un tratamiento térmico para obtener un número apropiado de núcleos; la temperatura debe ser relativamente baja para llevar al máximo la rapidez de formación de núcleos [figura 15-22*b*)]. Sin embargo, la rapidez general de cristalización depende de la rapidez de crecimiento de los cristales en cuanto ocurre la formación de núcleos; se requiere de temperaturas más altas para llevar al máximo la rapidez de crecimiento. En consecuencia, se puede usar un programa de tratamiento térmico similar al que aparece en la figura 15-22*c*) para el vidrio-cerámico Li_2O-Al_2O_3-SiO_2 (Pyroceram^{MR}). El paso de baja temperatura aporta los sitios de formación de núcleos, y la etapa a alta temperatura acelera la rapidez de crecimiento de los cristales; la pieza puede llegar a cristalizarse hasta 99%.

Esta estructura especial de los vidrios-cerámicos puede aportar una buena tenacidad y resistencia mecánica, con frecuencia aunada a un bajo coeficiente de expansión térmica y a una resistencia

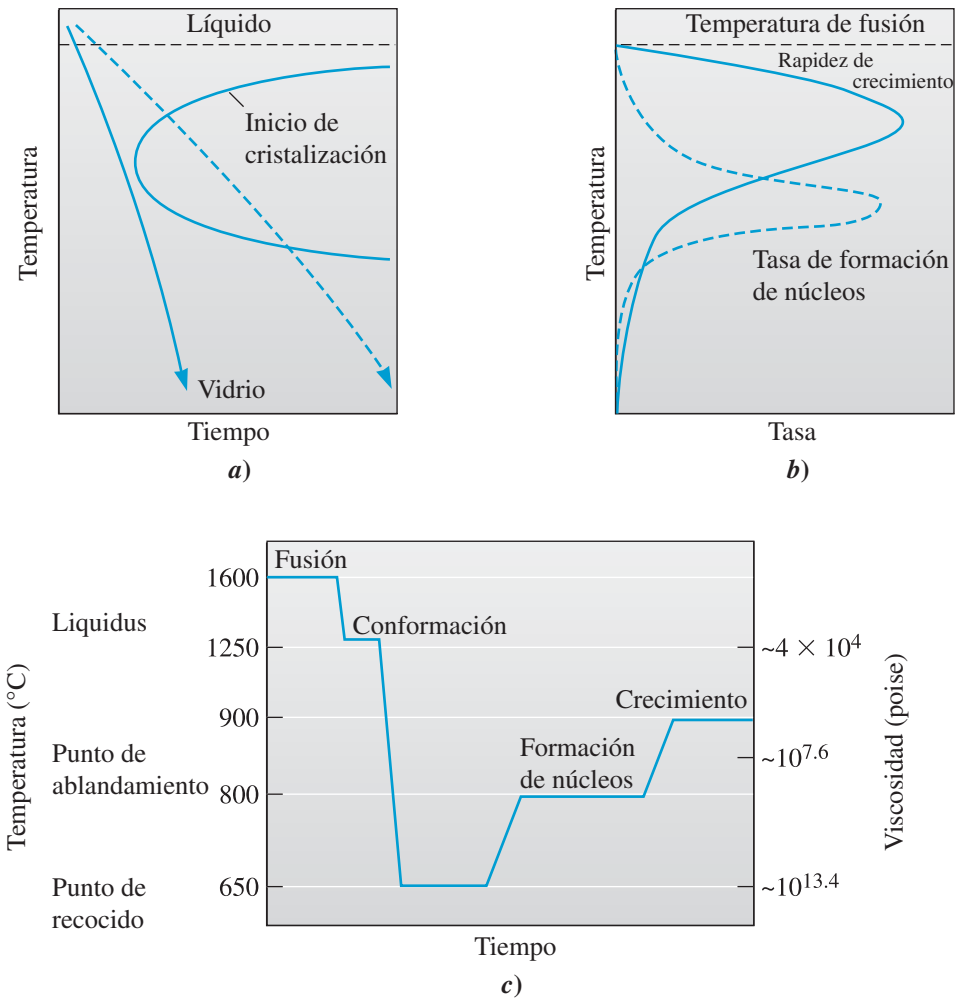


Figura 15-22 Producción de un vidrio-cerámico: *a*) El enfriamiento debe ser rápido, para evitar el inicio de la cristalización. *b*) La rapidez de formación de núcleos de precipitados es alta a bajas temperaturas, mientras que la rapidez de crecimiento de los precipitados es alta a temperaturas más altas. *c*) Perfil de tratamiento térmico común para la fabricación de vidrio-cerámico, ilustrado aquí para vidrios Li_2O-Al_2O_3-SiO_2.

a la corrosión a altas temperaturas. Quizás el vidrio-cerámico de mayor importancia es el que se basa en el sistema Li_2O-Al_2O_3-SiO_2. Estos materiales se usan para la fabricación de utensilios de cocina (Corning Ware^{MR}) y cubiertas cerámicas para estufas. Otros vidrios-cerámicos se usan en comunicaciones, computadoras y aplicaciones ópticas.

15-9 Procesamiento y aplicaciones de productos de arcilla

Los productos de arcilla son aquellos que emplean arcilla y agua para unir las partículas cerámicas (que por lo general son partículas de sílice). Los productos de arcilla se han usado desde la Antigüedad en la fabricación de alfarería y ladrillos. Es por ello que forman parte de la clase llamada "cerámica tradicional". Aún se usan en la fabricación de alfarería y ladrillos, tuberías, utensilios de cocina y otros productos de uso común. Las arcillas son silicatos hídricos de hojas de aluminio con una estructura cristalina. La caolinita es el material de arcilla más común y su fórmula es $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Durante los tratamientos térmicos posteriores, se usan otros materiales como **agentes fundentes** (formadores de vidrio), por ejemplo el feldespato [$(K, Na)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$].

Técnicas de conformado para productos de arcilla

Los polvos, la arcilla, el fundente y el agua se mezclan y se les da forma. Las mezclas secas o semisecas se comprimen mecánicamente formando piezas "verdes" (sin hornear) con suficiente resistencia para poder manejarlas. Para una compactación más uniforme de piezas complejas, se puede utilizar un prensado isostático; los polvos se colocan en un molde de hule y se someten a altas temperaturas en un medio gaseoso o líquido. Contenidos más altos de humedad hacen que los polvos sean más plásticos o conformables. Los procesos de **conformado hidroplástico**, como la extrusión, el moldeo por tarraja (dar forma a una arcilla en un molde giratorio usando una herramienta de perfiles para formar la superficie interior) y el formado a mano, pueden aplicarse a estas mezclas plásticas. Las lechadas cerámicas pueden inyectarse en moldes cuando contienen grandes cantidades de plastificantes orgánicos en sustitución del agua.

Un contenido aún más alto de humedad permite la formación de barbotina, una lechada que se puede vaciar y que contiene polvo cerámico fino. Esta barbotina se vacía en un molde poroso y se lleva a cabo el vaciado o moldeo por escurrimiento (figura 15-10). El vaciado o moldeo por escurrimiento se utiliza en la fabricación de lavamanos y otros productos comerciales. Después del formado, las piezas cerámicas, o cerámica verde, todavía no tienen resistencia, contienen agua y otros lubricantes, y son porosas, por lo que se requiere un secado y quemado subsiguiente.

Secado y quemado de productos de arcilla

Durante el secado se elimina el exceso de humedad y ocurren grandes cambios dimensionales. Inicialmente, el agua existente entre las plaquetas de arcilla, es decir, el agua entre partículas, se evapora y produce la mayor parte de la contracción. Después ocurrirá un cambio dimensional relativamente pequeño cuando se evapore el agua restante entre los poros. Para obtener un secado uniforme en toda la pieza y minimizar de esta manera los esfuerzos, la distorsión y las grietas, se controlan cuidadosamente tanto la temperatura como la humedad.

La rigidez y la resistencia de una pieza cerámica se obtienen durante su **horneado** o **quemado**. Durante el calentamiento la arcilla se deshidrata, eliminando el agua que forma parte de la estructura cristalina de la caolinita, y la vitrificación o la fusión se inicia (figura 15-23). Las impurezas y el fundente reaccionan con las partículas cerámicas (SiO_2) y la arcilla, produciendo una fase líquida de bajo punto de fusión en la superficie de los granos. El líquido ayuda a eliminar la porosidad y después del enfriamiento se convierte en un vidrio rígido que une las partículas cerámicas. Esta fase vítrea proporciona una **unión cerámica**, pero también provoca una contracción adicional en todo el cuerpo cerámico.

El tamaño del grano de la pieza final lo determina principalmente el tamaño de las partículas originales. Además, conforme se incrementa el **fundente**, se reduce la temperatura de fusión, se forma más vidrio y los poros se hacen más redondos y pequeños. Un menor tamaño inicial de grano acelera este proceso al aportar más área superficial donde pueda ocurrir la **vitrificación**.

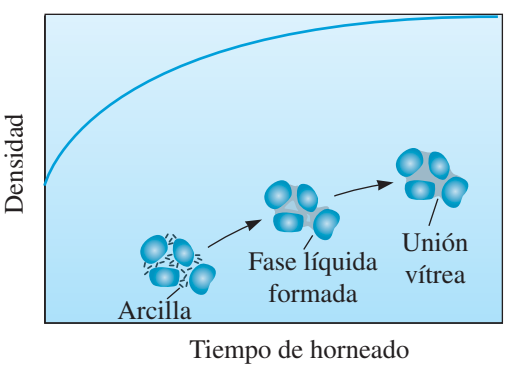


Figura 15-23 Durante el quemado, la arcilla y otros materiales fundentes reaccionan con las partículas más gruesas para producir una unión vítrea y reducir la porosidad.

Aplicaciones de productos de arcilla

Muchos productos de arcilla estructurales y lozas blancas se fabrican en estos procesos. Los ladrillos y las losas empleadas en la construcción se prensan o extruyen para darles forma, se secan y se queman para producir la unión cerámica. Las temperaturas de horneado más altas o los tamaños más finos de partículas originales producen una mayor vitrificación, menos porosidad y mayor densidad. La mayor densidad mejora las propiedades mecánicas, pero reduce las cualidades aislantes de los ladrillos o de las losas.

Los productos de barro son formas de arcilla porosa horneadas a temperaturas relativamente bajas. Se presenta poca vitrificación, la porosidad es muy alta e interconectada y los materiales cerámicos de barro pueden tener filtraciones. En consecuencia, estos productos deben estar recubiertos con un vidriado impermeable.

A temperaturas más altas de horneado, que proporcionan mayor vitrificación y menor porosidad, se produce el gres, el cual se usa para tuberías de drenaje y aguas negras, y contiene sólo de 2 a 4% de porosidad. Los productos cerámicos conocidos como porcelana requieren temperaturas de horneado aún más altas para obtener una vitrificación completa sin porosidad alguna.

15-10 Refractarios

Los materiales refractarios son componentes importantes en el equipo que se emplea para la producción, refinación y manejo de metales y vidrios, así como para la construcción de hornos de tratamiento térmico y otros equipos de procesos a altas temperaturas. Los **refractarios** deben soportar altas temperaturas sin sufrir corrosión o debilitamiento por el entorno circundante. Los más comunes están compuestos de partículas gruesas de óxido unidas por un material refractario más fino. Este último se funde durante el horneado proporcionando la unión. En algunos casos, los ladrillos refractarios tienen una porosidad aparente de entre 20 y 25% con la finalidad de obtener un mejor aislamiento térmico.

Los refractarios suelen clasificarse en tres grupos: ácido, básico y neutro, en función de su comportamiento químico (tabla 15-7). Los refractarios ácidos tienen una naturaleza ácida, es decir, forman iones de hidrógeno en entornos acuosos. Se emplean en entornos ácidos y no pueden usarse en entornos básicos porque se corroen y degradan. De manera similar, los refractarios básicos se emplean en entornos básicos, mientras que los neutros se usan en aplicaciones en las cuales el material refractario se someterá tanto a ambientes ácidos como básicos. Analizaremos los materiales y aplicaciones para cada uno de estos grupos.

Tabla 15-7 Composiciones de refractarios comunes (porcentaje en peso)

Refractario	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	Cr_2O_3
Ácido					
Sílice	95–97				
Ladrillo refractario de lata resistencia	51–53	43–44			
Ladrillo refractario de alta alúmica	10–45	50–80			
Básico					
Magnesita			83–93	2–7	
Olivina	43		57		
Neutro					
Cromita	3–13	12–30	10–20	12–25	30–50
Cromita-magnesita	2–8	20–24	30–39	9–12	30–50

Basado en Ceramic Data Book, Cahners Publishing Co., 1982.

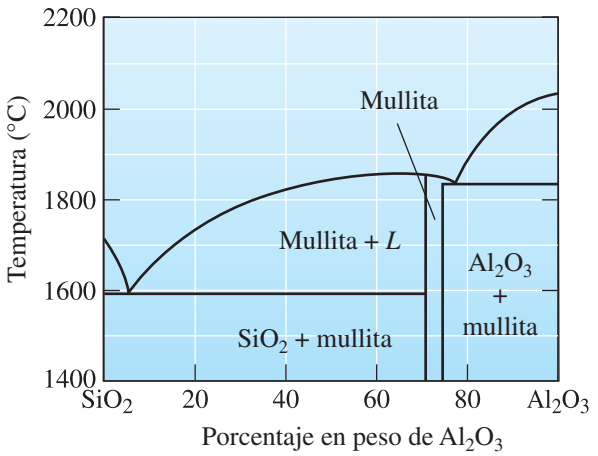


Figura 15-24 Diagrama de fases simplificado de SiO_2-Al_2O_3, base para los refractarios de silicatos de alúmina.

Refractarios ácidos Los refractarios ácidos comunes contienen sílice, alúmina y arcilla refractaria (una caolinita con algunas impurezas). A veces se usa la sílice pura para contener metales fundidos. En algunas aplicaciones la sílice puede ser aglutinada con pequeñas cantidades de óxido de boro, que se funde y produce la unión cerámica. Si se le agrega una pequeña cantidad de alúmina a la sílice, el refractario contiene un microconstituyente eutéctico de bajo punto de fusión (figura 15-24) y no resulta adecuado para aplicaciones refractarias a temperaturas por arriba de aproximadamente 1600°C, temperatura que con frecuencia es necesaria para la fabricación de aceros. Sin embargo, cuando se le agregan cantidades más grandes de alúmina, la microestructura contiene cantidades crecientes de mulita, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, que tiene una alta temperatura de fusión. En general, estos refractarios de barro son relativamente débiles, pero de bajo costo. Las concentraciones de alúmina superiores a cerca de 50% forman los refractarios de alta alúmina.

Refractarios básicos Varios refractarios están basados en MgO (magnesia o periclasa). El MgO puro tiene un alto punto de fusión, adecuadas capacidad refractaria y resistencia al ataque de los entornos básicos que suelen encontrarse en los procesos de fabricación de aceros. La olivina es un mineral que se presenta como solución sólida de Mg_2SiO_4 y Fe_2SiO_4. La Mg_2SiO_4 pura se conoce como fosterita y tiene una temperatura de fusión muy alta, de alrededor de 1900°C. La olivina se añade a los hornos para formar una escoria, que es el subproducto de refinamiento de los minerales metálicos. La arena de olivino se usa a veces para contener los metales vaciados en la arena de fundición. Otros refractarios de magnesia pueden incluir CaO o carbono. Por lo general, los refractarios básicos son más caros que los ácidos.

Refractarios neutros Estos refractarios, que incluyen la cromita y la cromitamagnesita, pueden usarse para separar refractarios básicos de los ácidos y evitar que se ataquen entre sí.

Refractarios especiales En muchas aplicaciones refractarias se usa el carbono, o grafito, en particular cuando no está presente el oxígeno. Otros materiales refractarios son la zirconia (ZrO_2), el zircón ($ZrO_2 \cdot SiO_2$), así como una diversidad de nitruros, carburos y boruros. La mayoría de los carburos, como el TiC y el ZrC, no resisten bien la oxidación y sus aplicaciones a altas temperaturas son más adecuadas para condiciones de reducción. Sin embargo, el carburo de silicio es una excepción; cuando el SiC se oxida a altas temperaturas, se forma en su superficie una delgada capa de SiO_2 que protege al SiC contra oxidación adicional hasta aproximadamente 1500°C. Los nitruros y los boruros también tienen altas temperaturas de fusión y son menos susceptibles a la oxidación. Algunos de los óxidos y de los nitruros son candidatos para su uso en motores a reacción.

15-11 Otros materiales cerámicos

Además de su uso en la producción de materiales para la construcción, de aparatos domésticos, materiales estructurales y refractarios, los productos cerámicos encuentran una gran cantidad de aplicaciones, incluidas las siguientes.

Cementos

Las materias primas cerámicas se unen mediante un aglutinante sin necesidad de quemado o sinterizado, en un proceso conocido como **cementación**. Una reacción química convierte una resina líquida en un sólido que une las partículas. En el caso del silicato de sodio, la introducción del gas CO_2 actúa como catalizador para deshidratar la solución de silicato de sodio, formando un material vítreo:

$$x\text{Na}_2\text{O} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{vidrio (no balanceado)}$$

La figura 15-25 muestra los granos de arena sílice que se usan en la fundición de metales para producir moldes. El silicato de sodio líquido recubre los granos de arena proporcionando puentes entre los mismos. La introducción de CO_2 convierte los puentes en un sólido, uniendo a los granos de arena.

Las soluciones de polvo fino de alúmina catalizadas con ácido fosfórico producen un cemento de fosfato de aluminio:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow 2\text{AlPO}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$$

Cuando se unen partículas de alúmina con el cemento de fosfato de aluminio, se producen refractarios capaces de operar a temperaturas de hasta 1650°C.

El yeso es otro material que se endurece mediante una reacción de cementación:

$$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\ \text{H}_2\text{O} + 3/2\ \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$$

Cuando reacciona la lechada líquida, crecen cristales sólidos de entrelazamiento de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) con poros muy pequeños entre los cristales. Una mayor cantidad de agua en la lechada original proporciona más porosidad, aunque también reduce la resistencia final del yeso. Uno de los usos más importantes de este material es para la construcción de paredes en los edificios.

Las reacciones de cementación más comunes y de mayor importancia se presentan en el cemento Portland, que se usa para producir el concreto.

Recubrimientos

Los productos cerámicos suelen usarse en recubrimientos protectores para otros materiales. Los **vidriados** y los **esmaltados** son recubrimientos comerciales de uso común. Los vidriados se aplican en las superficies de materiales cerámicos para sellar el cuerpo permeable de arcilla, para proteger y decorar o para fines especiales. Los esmaltes se aplican sobre superficies metálicas. Los esmaltes y los vidriados son productos de arcilla que se vitrifican fácilmente durante el horneado. Una composición común es $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Figura 15-25 Micrografía de granos de arena sílice unidos con silicato de sodio a través del mecanismo de cementación (60 ×). (*Reimpreso por cortesía de Don Askeland.*)

Mediante la adición de otros minerales se pueden producir colores especiales en los vidriados y en los esmaltes. Con el silicato de zirconio se obtiene un vidriado blanco; con el óxido de cobalto, un vidriado azul; con el óxido de cromo, uno verde; con el óxido de plomo, el color es amarillo; el vidriado rojo se logra agregando una mezcla de sulfuros de cadmio y de selenio.

Uno de los problemas que presentan los vidriados o los esmaltes es el agrietamiento (cuarteaduras en la superficie), que ocurre cuando el vidriado tiene un coeficiente de expansión térmica diferente al del material subyacente. Con frecuencia, este es el factor más importante para determinar la composición del recubrimiento.

Para materiales cerámicos avanzados y metales de operación a altas temperaturas, se usan recubrimientos especiales. A los materiales compuestos carbono-carbono se les aplican recubrimientos de SiC, con la intención de mejorar su resistencia a la oxidación. A las superaleaciones basadas en níquel se les aplican recubrimientos de zirconia como barreras térmicas para proteger el metal contra la fusión o contra reacciones adversas.

Películas delgadas y cristales individuales

Se pueden producir películas delgadas en muchos materiales cerámicos complejos y multicomponentes aplicando diferentes técnicas; por ejemplo, deposición electrónica, sol-gel y deposición química de vapor (DQV). Normalmente, el espesor de estas películas es de 0.05 a 10 μm, y más quizá superior a 2 μm. Muchas películas delgadas de cerámicos electrónicos funcionales se preparan e integran en obleas de silicio, en vidrios y en otros sustratos. Por ejemplo, las tiras magnéticas existentes en las tarjetas de crédito usan películas delgadas de óxido de hierro (γ-Fe_2O_3 o Fe_3O_4) para el almacenamiento de datos. El óxido de estaño indio (ITO, *indium tin oxide*), un material transparente y conductor, se aplica sobre el vidrio y se emplea en aplicaciones como los desplegados de pantalla táctil (tabla 15-1). Se usan muchos otros recubrimientos sobre los vidrios con objeto de hacerlos eficientes en la transmisión de energía. Recientemente se inventó un vidrio que se limpia a sí mismo usando un recubrimiento de TiO_2. Del mismo modo, se pueden preparar y usar películas delgadas de materiales cerámicos, como las soluciones sólidas de titanato de zirconio de plomo (PZT), PZT dopado con lantano (PLZT) y $BaTiO_3$-$SrTiO_3$. A veces, las películas presentan una orientación o textura que puede resultar ventajosa para una aplicación determinada. En muchas aplicaciones eléctricas y electroópticas se usan cristales individuales de numerosos materiales cerámicos [por ejemplo, SiO_2 o cuarzo, niobato de litio ($LiNbO_3$), zafiro, o almandinato de itrio aluminio]. Estos cristales se hacen crecer a partir de fusiones aplicando técnicas similares a las descritas en el capítulo 9.

Fibras

Las fibras se producen a partir de materiales cerámicos para usos diversos: como refuerzo en materiales compuestos, para ser tejidas o para usarse en sistemas de fibra óptica. Las fibras de vidrio de borosilicato, que son las más comunes, proporcionan resistencia y rigidez en la fibra de vidrio. Las fibras pueden producirse a partir de otros materiales cerámicos diversos, incluyendo la alúmina, el carburo de silicio, la sílice y el carburo de boro. También se puede utilizar el proceso sol-gel para producir fibras comerciales con muchas aplicaciones.

Un material fibroso de tipo especial es la loseta de sílice que se usa para formar el sistema de protección térmica de los transbordadores espaciales de la NASA. Para producir una loseta excepcionalmente ligera con densidades de sólo 0.144 g/cm^3, se aglutinan fibras de sílice con sílice coloidal; la loseta se recubre con vidriados especiales de alta capacidad de emisión, a fin de obtener una protección de hasta 1300°C.

Unión y ensamblaje de piezas cerámicas

Con frecuencia, los productos cerámicos se fabrican como componentes monolíticos en lugar de muchas piezas ensambladas. Cuando se ponen en contacto dos piezas cerámicas bajo carga, se crean concentraciones de esfuerzo en la frágil superficie, lo que provoca una mayor probabilidad de falla. Además, los métodos para la unión de piezas cerámicas en un ensamblaje mayor son pocos y limitados. Los materiales cerámicos frágiles no pueden unirse mediante procesos de soldadura de fusión o unión por deformación. A bajas temperaturas se pueden lograr uniones adhesivas empleando materiales poliméricos; a temperaturas más altas se pueden usar cementos cerámicos. Para unir materiales cerámicos entre sí, o para unir materiales cerámicos a metales, se puede utilizar la **unión por difusión** o la soldadura fuerte. La unión por difusión es una técnica en la que se presionan dos superficies entre sí con niveles altos de

presión y temperatura. La difusión de los átomos en la interfase llena los vacíos y produce enlaces fuertes entre las dos superficies.

Resumen

- Los cerámicos son materiales inorgánicos con una alta dureza y un alto punto de fusión; incluyen los materiales cerámicos monocristalinos y los policristalinos, así como los vidrios-cerámicos. Entre los materiales cerámicos comunes se encuentran los aislantes eléctricos y térmicos de adecuada estabilidad química y satisfactoria resistencia a la compresión.
- Los materiales cerámicos desempeñan una función determinante en una amplia gama de tecnologías relacionadas con la electrónica, el magnetismo, la óptica y la energía. Numerosos materiales cerámicos avanzados desempeñan un papel muy importante al brindar aislamiento térmico y propiedades a altas temperaturas. Las aplicaciones de los materiales cerámicos abarcan desde tarjetas de crédito, cápsulas para chips de silicio y losetas para transbordadores espaciales, hasta fibras ópticas que permiten las comunicaciones y vidrios con energía y seguridad eficientes. Los materiales cerámicos tradicionales funcionan como refractarios para el procesamiento de metales y en aplicaciones de consumo.
- Las cerámicas cristalinas contienen dislocaciones, pero la mayoría de las cerámicas policristalinas no se deforman plásticamente. Las fallas como grietas y los poros determinan el desempeño mecánico de los materiales cerámicos, ya que limitan su capacidad para resistir las cargas de tensión.
- El procesamiento de los materiales cerámicos por lo general se lleva a cabo mediante compactación y sinterizado. En aplicaciones especializadas se utiliza la compactación isostática, el prensado en caliente y el prensado isostático en caliente (PIC), especialmente para obtener niveles más altos de densificación.
- La técnica de fundición en cinta, el moldeo o vaciado por escurrimiento, la extrusión y el moldeo por inyección son algunas otras técnicas que se utilizan para darles diferentes formas a los materiales cerámicos verdes. A estos procesos les sigue una etapa de quemado u horneado en la que se queman los aglutinantes y los plastificantes y se sinteriza el material cerámico resultante.
- El dióxido de silicato, conocido como sílice, y los silicatos (compuestos con base de silicio) tienen aplicaciones importantes en la industria, tanto en sus formas cristalinas como amorfas. Los constituyentes básicos de estos compuestos son las unidades moleculares de SiO_4 en las que el átomo de silicio se encuentra en el centro de un tetraedro de átomos de oxígeno.
- Numerosos silicatos y otros materiales cerámicos forman vidrios con una facilidad razonable, dado que la cinética de la cristalización es lenta. Se pueden formar vidrios en hojas usando vidrio flotado, fibras u otras formas. Se emplean vidrios de silicato en un importante número de aplicaciones que incluyen vidrios para ventanas, parabrisas, fibras ópticas y fibras de vidrio.
- A los vidrios-cerámicos se les da forma mediante la cristalización controlada de los vidrios inorgánicos. Estos materiales se usan ampliamente en utensilios de cocina y muchas otras aplicaciones.
- Los productos de arcilla usan silicatos hídricos de hoja de aluminio con estructura cristalina y agua para unir partículas cerámicas. Los productos de arcilla incluyen productos de alfarería, porcelana y losa fina.
- Los refractarios son materiales que se emplean en aplicaciones de alta temperatura y deben elegirse con base en su composición para que no reaccionen ni se degraden en su entorno.

Glosario

Barbotina Suspensión líquida que se vacía en un molde. Cuando la lechada comienza a endurecerse en las superficies del molde, se vierte la suspensión líquida remanente y sólo queda una pieza cerámica hueca.

Cementación Unión de materias primas cerámicas mediante aglutinantes que forman un vidrio o gel sin horneado a altas temperaturas.

Cerámica Material inorgánico con alta temperatura de fusión. Por lo general es duro y frágil.

Cerámica verde Cerámica a la que se le ha dado la forma deseada, pero que todavía no ha sido sinterizada.

Cermet Compuesto cerámico metálico (por ejemplo, WC-Co) que logra una buena combinación de dureza con otras propiedades, como la tenacidad.

Compactación Aplicación de una carga a un polvo cerámico en un dado para darle la forma deseada y eliminar la porosidad de la cerámica verde.

Conformado hidroplástico Varios procesos mediante los cuales se moldea un cuerpo cerámico de arcilla húmeda y se le da una forma útil.

Crecimiento anormal de granos Tipo de crecimiento de granos que se observa en los materiales metálicos y cerámicos. En este tipo de crecimiento, surge una distribución bimodal en la que algunos granos crecen mucho a expensas de los granos más pequeños.

Densidad volumétrica Masa del cuerpo cerámico por unidad de volumen, incluyendo tanto la porosidad cerrada como la interconectada.

Devitrificación Cristalización del vidrio.

Enlace por difusión Técnica de enlazamiento en la que se presionan dos superficies a niveles altos de presión y temperatura. La difusión de los átomos en la interfase llena los vacíos y produce un enlace fuerte entre las superficies.

Esmalte Recubrimiento cerámico sobre metal.

Extrusión Técnica de procesamiento en la que se presiona una combinación de polvo cerámico con un aglutinante a través de un dado de sección transversal constante.

Formadores de vidrio Óxidos con una alta capacidad de aglutinamiento que produce con facilidad un vidrio durante su procesamiento.

Fundente Adiciones a materias primas cerámicas que promueven la fundición.

Fundición en cinta Proceso para elaborar hojas delgadas de material cerámico mediante una lechada cerámica que consiste en aglutinantes, plastificantes, etc. Este barro se vacía con la ayuda de una cuchilla en un sustrato plástico. La cinta verde resultante se seca, se corta y maquina a continuación para su uso en dispositivos cerámicos electrónicos y otros.

Horneado o quemado Calentamiento de un cuerpo cerámico a una temperatura alta para que se origine la formación de una unión cerámica.

Intermedios Óxidos que al ser agregados a un vidrio ayudan a extender la red vítrea; por lo general no forman un vidrio por sí mismos.

Lechada Suspensión de partículas en un líquido.

Modificadores Óxidos que al combinarse con un vidrio rompen su estructura de red y evitan la formación de vidrio.

Moldeo por escurrimiento Conformado de una pieza cerámica hueca mediante la introducción de una lechada que se puede vaciar en un molde. El agua de la lechada se extrae hacia el molde poroso y se deja una superficie más seca. La lechada excedente se puede decantar entonces.

Moldeo por inyección Técnica de procesamiento en la cual una masa termoplástica cargada de polvos cerámicos se mezcla en un dispositivo de tipo extrusión y después se inyecta en un molde para formar un componente complejo. En los materiales cerámicos, el material termoplástico se quema. Este procedimiento también se utiliza ampliamente para la conformación de materiales termoplásticos (capítulo 16).

Parisón Forma vítrea burda que sirve como paso intermedio en la producción de cristalería de vidrio. Posteriormente se da forma al parisón para obtener un producto terminado.

Polvo Conjunto de partículas finas.

Porosidad aparente Porcentaje de porosidad interconectada en un cuerpo cerámico.

Porosidad verdadera Porcentaje de un cuerpo cerámico compuesto tanto por porosidad cerrada como por porosidad interconectada.

Prensado en caliente Técnica de procesamiento de materiales cerámicos en la que el sinterizado se efectúa bajo presión uniaxial.

Prensado isostático en caliente Técnica de procesamiento de polvos con la que se pueden fabricar grandes piezas de metales, aleaciones y cerámicos, utilizando el sinterizado bajo una presión hidrostática generada por un gas.

Prensado isostático en frío Técnica de conformación de polvos en la cual, durante la compactación, se aplica presión hidrostática. Se utiliza para lograr una densidad más alta de la cerámica verde o mejor compactación de formas más complejas.

Refractarios Grupo de materiales cerámicos capaces de soportar altas temperaturas durante periodos prolongados.

Secado por aspersión Se rocía una lechada de polvos cerámicos en una cámara espaciosa en presencia de aire caliente. Esto lleva a la formación de aglomerados blandos que pueden fluir con facilidad en los moldes que se usan durante la compactación de polvos.

Sinterización Proceso en el que un material se calienta a una alta temperatura para incrementar su densidad.

Temperatura de transición vítrea Temperatura por debajo de la cual un líquido subenfriado se convierte en vidrio.

Unión cerámica Aglutinamiento de materiales cerámicos que permite la formación de un producto vítreo a altas temperaturas de horneado.

Vidriado Recubrimiento cerámico aplicado al vidrio. El vidriado contiene fases cerámicas vítreas y cristalinas.

Vidrio Material amorfo que se obtiene al enfriar un material cerámico fundido.

Vidrio laminado Vidrio recocido con un polímero (por ejemplo, butiralpolivinilo, PVB) emparedado entre dos vidrios, que se usa en parabrisas de automóviles.

Vidrio templado Vidrio de alta resistencia que tiene una capa superficial donde el esfuerzo es de compresión, mismo que ha sido inducido térmicamente durante el enfriamiento o mediante la difusión química de iones.

Vidrios-cerámicos Formas de cerámica en estado vidrioso y que posteriormente se dejan cristalizar durante un tratamiento térmico para lograr mejor resistencia y tenacidad.

Vitrificación Formación de un vidrio.

Problemas

15-1 Enlaces en los materiales cerámicos

15-1 ¿Cuáles son los tipos principales de enlaces atómicos en materiales cerámicos?

15-2 ¿Cuáles son algunas de las características comunes de los materiales cerámicos?

15-3 Explique cualquier aplicación para los siguientes materiales cerámicos: *a*) alúmina, *b*) sílice, *c*) titanato de bario, *d*) zirconia, *e*) carburo de boro y *f*) diamante.

15-4 Se realizan pruebas a la zirconia cúbica y al diamante para determinar su expansión en intervalos de incremento de temperatura. Suponga que ambos materiales son puros. ¿Qué tanto más se expandirá la muestra de ZrO_2 que la de diamante? ¿Le permite esto diferenciar ambos materiales?

15-5 Convierta los valores de las propiedades de Al_2O_3 de la tabla 15-3 a unidades del sistema internacional (SI).

15-2 Propiedades de materiales cerámicos cristalinos.

15-6 La tabla 15-4 describe la estructura del cloruro de sodio como una red cúbica centrada en la cara con bases de Cl (0, 0, 0) y Na (1/2, 0, 0). Elabore tres descripciones equivalentes para las posiciones del ion de Na considerando Cl (0, 0, 0) como un ion de la base.

15-7 La tabla 15-4 describe la estructura del cloruro de sodio como una red cúbica centrada en la cara con bases de Cl (0, 0, 0) y Na (1/2, 0, 0). Elabore tres descripciones equivalentes para las posiciones del ion de Cl considerando Na (0, 0, 0) como un ion de la base.

15-8 La tabla 15-4 describe la estructura de la blenda de zinc como una red centrada en la cara con bases de S (0, 0, 0) y Zn (1/4, 1/4, 1/4). Elabore tres descripciones equivalentes para las posiciones del ion de Zn considerando a S como un ion en la base.

15-9 ¿Cuál sería el factor de empaquetamiento de una estructura cúbica cristalina centrada en la cara que tiene todos sus sitios tetraédricos llenos con átomos que caben perfectamente en cada uno de ellos?

15-10 ¿Cuál sería el factor de empaquetamiento de una estructura cúbica cristalina centrada en la cara que tiene todos sus sitios octaédricos llenos con átomos que caben perfectamente en cada uno de ellos?

15-11 ¿Cuál sería el factor de empaquetamiento de una estructura hexagonal cristalina cerrada que tiene todos sus sitios tetraédricos llenos con átomos que caben perfectamente en cada uno de ellos? Considere que cada celda unitaria cerrada tiene cuatro sitios tetraédricos con la misma

razón de radio que los sitios tetraédricos de una estructura CCCa.

15-3 Defectos en las cerámicas cristalinas

15-4 Fallas en los materiales cerámicos

15-12 En los metales es importante la deformación plástica debida a los movimientos de dislocaciones; sin embargo, esto no es una consideración de importancia para las propiedades de los materiales cerámicos y de los vidrios. Explique.

15-13 ¿Por qué la resistencia a la tensión de los materiales cerámicos es menor que su resistencia a la compresión?

15-14 Explique por qué los materiales cerámicos tienden a mostrar amplia dispersión en sus propiedades mecánicas.

15-15 ¿Cuál es el significado de los términos "porosidad aparente" y "porosidad verdadera"?

15-16 La gravedad específica del Al_2O_3 es 3.96 g cm^3. Mediante el sinterizado del polvo de alúmina se produce una pieza cerámica. Cuando está seca, pesa 80 g; después de sumergirla en agua, 92 g, y cuando está suspendida en agua, 58 g. Calcule la porosidad aparente, la porosidad verdadera y la porosidad cerrada.

15-17 El carburo de silicio (SiC) tiene una gravedad específica de 3.1 g/cm^3. Se produce una pieza de SiC sinterizada, que ocupa un volumen de 500 cm^3 y que pesa 1200 g. Después de sumergirse en agua, la pieza pesa 1250 g. Calcule la densidad volumétrica, la porosidad verdadera y la fracción volumétrica de la porosidad total formada por poros cerrados.

15-18 Un material cerámico de óxido sinterizado de zirconia (ZrO_2) tiene una porosidad verdadera de 28%, y la fracción cerrada de poros es de 0.5. Si el peso después de sumergirla en agua es de 760 g, ¿cuál es el peso en seco del material cerámico? La gravedad específica del ZrO_2 es de 5.68 g/cm^3.

15-19 El equipo de control de calidad de una planta de procesamiento de material cerámico toma una muestra grande de cerámica de la línea de producción y la pesa seca, sumergida en agua y después de sumergirla. Los pesos que obtiene son 0.721 kg, 0.714 kg y 0.741 kg, respectivamente. Calcule la porosidad aparente y el volumen de los poros interconectados.

15-20 Los siguientes datos corresponden a las propiedades físicas de una muestra conocida: W_w = 50.0 g, ρ = 2.170g/cm^3 y porosidad verdadera = 39.0%. Encuentre la densidad volumétrica.

15-5 Síntesis y procesamiento de los materiales cerámicos cristalinos

15-21 Explique la razón por la que los materiales cerámicos suelen procesarse como polvos. ¿Cómo difiere o se asemeja esta condición al procesamiento de los metales?

15-22 ¿Cuál es la fuerza impulsora del sinterizado?

15-23 ¿Cuáles son los mecanismos de difusión que desempeñan el papel de mayor importancia en el sinterizado en estado sólido de materiales cerámicos?

15-24 Explique el uso de los siguientes procesos (utilice un esquema cuando sea necesario): *a*) compactación y sinterizado uniaxial, *b*) prensado en caliente, *c*) prensado isostático en caliente (PIC) y *d*) fundición en cinta.

15-25 ¿Cuáles son algunas de las características de importancia de los materiales cerámicos sinterizados?

15-6 Sílice y compuestos de silicato

15-26 ¿Cuál es la razón principal por la que el vidrio se forma con facilidad en los sistemas de silicatos?

15-27 ¿Qué material se utiliza para fabricar las losetas de protección térmica de los transbordadores espaciales de la NASA?

15-28 ¿Cuántos átomos hay en una celda unitaria de cristobalita β?

15-29 Realice un bosquejo de la celda unitaria de cristobalita β vista desde las direcciones [100] y [110].

15-30 ¿Cuántas configuraciones diferentes de dos tetraedros de SiO_4 puede graficar? ¿Cuántas configuraciones de tres tetraedros que solamente comparten esquinas puede graficar?

15-31 Elabore un reporte sobre el vidrio conocido con la marca "Gorilla Glass". Liste las referencias o sitios web que consultó.

15-7 Vidrios inorgánicos

15-32 ¿Qué significa el término "temperatura de transición vítrea"? ¿Es fija esta temperatura para una composición determinada de vidrio?

15-33 Una barra de cuarzo de 27.500 cm de largo se calienta a partir de la temperatura ambiente a 600°C en un proceso lento y uniforme. ¿Cuál será la longitud de la barra después de estar a esta temperatura el tiempo suficiente para equilibrarse?

15-34 Defina los términos "formadores de vidrio", "intermedios" y "modificadores".

15-35 Los siguientes pasos muestran el procesamiento de la sílice:

1. Calentar 15 mol% sosa-85 %mol sílice a 1800°C.
2. Enfriar a 1200°C.
3. Incrementar el contenido de sosa a 25 %mol a una temperatura constante.
4. Enfriar a 1000°C.
5. Incrementar el contenido de sosa a 35 %mol a una temperatura constante.

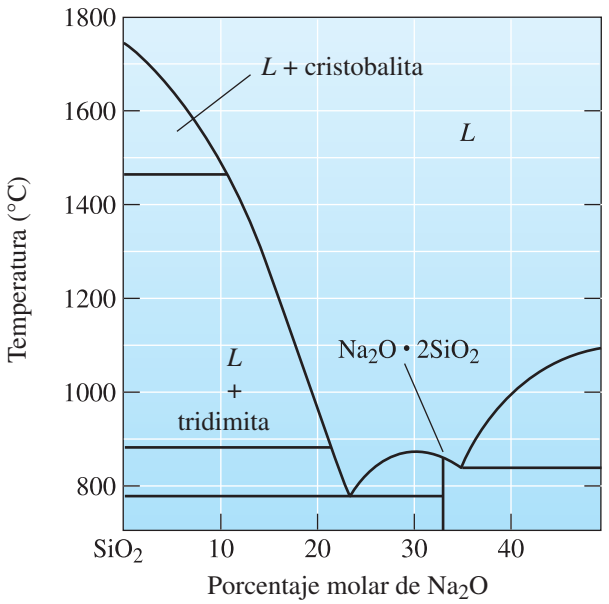


Figura 15-17 Diagrama de fases de SiO_2-Na_2O. Las adiciones de sosa (Na_2O) a la sílice reducen de forma considerable la temperatura de fusión de la sílice al formar eutécticos. (Repetida para el problema 15-35.)

¿Qué sólidos se forman durante este proceso, si es que lo hacen? Vea la figura 15-17.

15-36 Liste la viscosidad de los vidrios de la figura 15-18 en centipoises (cP) a 1200°C.

15-37 ¿Cuántos gramos de BaO se pueden agregar a 1 kg de SiO_2 antes de que la relación O:Si exceda 2.5 y las tendencias de formación de vidrio sean malas? Compare lo anterior con el caso en que se le agrega Li_2O al SiO_2.

15-38 Calcule la relación O:Si cuando se agregan al SiO_2 30% en peso de Y_2O_3. ¿Este material tendrá buenas tendencias de formación de vidrio?

15-39 Un silicato de vidrio tiene 10 %mol de Na_2O y 5 %mol de CaO. Calcule la relación O:Si y la composición en %pe para este vidrio.

15-40 Un vidrio de borosilicato (82% de SiO_2, 2% de Al_2O_3, 4% de Na_2O, 12% de B_2O_3) tiene una densidad de 2.23 g/cm^3, en tanto que el vidrio de sílice fundida (suponga 100% de SiO_2) tiene una densidad de 2.2 g/cm^3. Explique por qué la densidad del vidrio de borosilicato es diferente del promedio ponderado de las densidades de sus componentes. Las densidades de Al_2O_3, Na_2O y B_2O_3 son 3.98 g/cm^3, 2.27 g/cm^3 y 2.5 g/cm^3, respectivamente.

15-41 Clasifique los siguientes vidrios por temperatura de ablandamiento (del más alto al más bajo):

a) Pyrex^{MR} (81% de SiO_2, 2% de Al_2O_3, 4% de Na_2O, 12% de B_2O_3);

b) Vidrio de cal (72% de SiO_2, 1% de Al_2O_3, 10% de CaO, 14% de Na_2O), y

c) Vycor^{MR} (96% de SiO_2, 4% de B_2O_3).

15-42 Una hoja de vidrio de borosilicato se obtiene con el método de estaño fundido. ¿Cuál es la temperatura de solidificación del estaño puro? ¿Reducirá ésta el rango de trabajo del vidrio?

15-8 Vidrios-cerámicos

15-43 ¿En qué difiere un vidrio-cerámico de un vidrio y de un material cerámico?

15-44 ¿Cuáles son las ventajas del uso de vidrios-cerámicos en comparación ya sea con vidrios o materiales cerámicos?

15-45 Elabore un bosquejo de un perfil común de tratamiento térmico que se utiliza en el procesamiento de vidrios-cerámicos.

15-46 ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones más importantes de los vidrios-cerámicos?

15-9 Procesamiento y aplicaciones de los productos de arcilla

15-10 Materiales refractarios

15-11 Otros materiales cerámicos

15-47 ¿Cuál es la diferencia máxima que puede existir entre las masas de MgO que se necesitan para obtener 10 kg de cromita refractaria y 10 kg de cromita magnesita?

15-48 ¿Cuál es la temperatura mínima en la que una mezcla de SiO_2-Al_2O_3 se mantendrá completamente líquida? (Vea la figura 15-24).

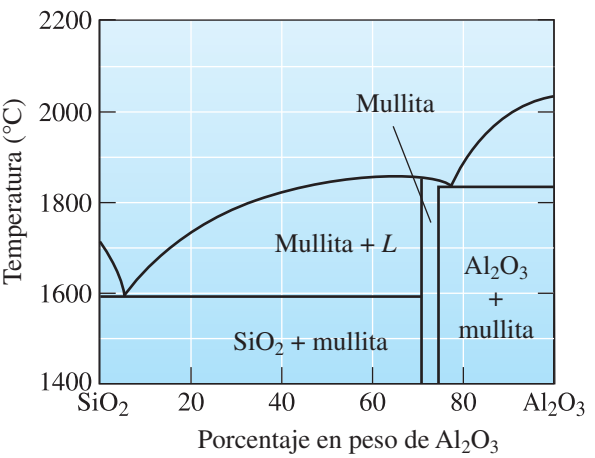


Figura 15-24 Diagrama de fases simplificado de SiO_2-Al_2O_3, base para los refractarios de silicatos de alúmina. (Para el problema 15.48.)

15-49 ¿Qué significan los términos "vidriado" y "esmalte"?

Problemas de diseño

15-50 Diseñe un vidrio de sílice de sosa-cal que se pueda fundir y vaciar a 1300°C y que tenga una

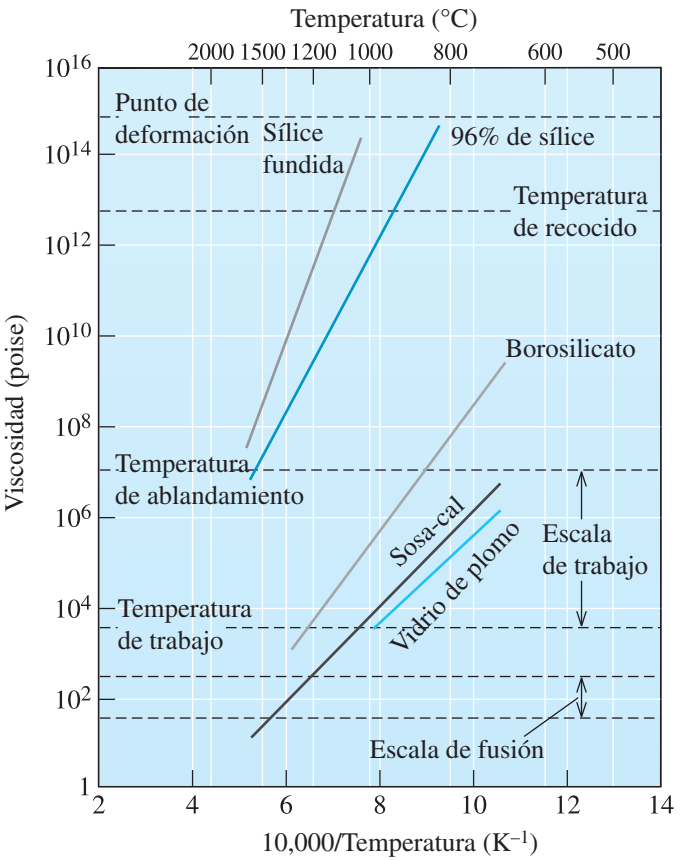


Figura 15-18 Efecto de la temperatura y la composición en la viscosidad del vidrio. (Repetida para los problemas 15-36 y 15-48).

relación O:Si menor de 2.3 para asegurar buena tendencia a la formación de vidrios. Para asegurar una viscosidad adecuada, la temperatura de vaciado debe estar por lo menos 100°C arriba de la temperatura de liquidus.

Problemas por computadora

15-51 *Densidad aparente y volumétrica*. Edite un programa que le solicite al usuario la información necesaria del cálculo de la densidad aparente y en volumen de piezas cerámicas. El programa también deberá calcular la porosidad interconectada y la porosidad cerrada.

Problemas Knovel[MR]

K15-1 ¿Cuáles son tamaños comunes de grano y los parámetros de sinterización para las nanocerámicas?

K15-2 ¿Cuáles son las ventajas de los recubrimientos sol-gel sobre otros recubrimientos de materiales cerámicos?

K15-3 ¿Cuáles son valores comunes para el porcentaje de expansión térmica lineal de refractarios? Con ayuda de gráficas interactivas, determine cuáles refractarios experimentan mayor expansión térmica lineal a 1200°C: ¿zirconia o alúmina?

Los polímeros pueden procesarse en diferentes formas por medio de diversas técnicas de fabricación. Esta imagen muestra la extrusión de un tubo termoplástico fundido. Antes de que el polímero se solidifique por completo, se sopla aire caliente a través del tubo y se mueve hacia arriba verticalmente, haciendo que expanda varias veces su diámetro. El tubo plano se sella con calor en uno de los extremos y se corta por el otro para formar bolsas de plástico, o se corta a lo largo para obtener hojas plásticas. (© *Bob Masini/Phototake*)

CAPÍTULO 16

Polímeros

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿De qué están hechos los DVD?*
- *¿De qué está hecho el Silly Putty®?*
- *¿Qué polímero se usa en la goma de mascar?*
- *¿Cuál fue la primera fibra sintética que se fabricó?*
- *¿Por qué algunos plásticos son "a prueba de lavavajillas" y otros no?*
- *¿De qué están fabricados los chalecos a prueba de balas?*
- *¿Qué polímero se usa para utensilios de cocina antiadherentes?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Describir la estructura, propiedades y procesamiento de tres clases de polímeros: termoplásticos, termoestables y elastómeros.
- Describir los procesos de polimerización por condensación y por adición.
- Explicar el proceso de enlace cruzado y la forma en que éste influye en las propiedades de los materiales termoestables.
- Definir la transición vítrea.
- Calcular el grado de polimerización y el peso molecular, y explicar su significado con respecto al comportamiento mecánico de los polímeros.
- Comparar las propiedades físicas y mecánicas de los polímeros con las de los metales.

En este capítulo se estudiará la estructura, propiedades y el procesamiento de polímeros. El sufijo *mero* significa "unidad", por lo que polímero significa "muchas unidades". En este contexto, el término polímero se refiere a un grupo unitario de átomos o moléculas que define una distribución característica para un polímero. Los **polímeros** son materiales formados por cadenas de moléculas. Las cadenas tienen pesos moleculares promedio que van de 10,000 a más de un millón de g/mol y que se forman al unir muchos meros o unidades

mediante un enlace químico para formar moléculas gigantes conocidas como macromoléculas. El peso molecular se define como la suma de las masas atómicas de cada molécula. La *polimerización* es un proceso mediante el cual pequeñas moléculas formadas por una unidad (conocida como **monómero**) o algunas unidades (denominadas **oligómeros**) se unen químicamente para crear moléculas gigantes. Por lo regular, la polimerización comienza con la producción de largas cadenas en las que los átomos están fuertemente unidos mediante un enlace covalente. Casi todos los polímeros son orgánicos, lo cual significa que su base es carbono, pero también pueden ser inorgánicos (por ejemplo, las siliconas basadas en una red Si-O).

Los **plásticos** son materiales compuestos principalmente de polímeros de origen natural y modificado, o de polímeros hechos en forma artificial que a veces contienen fibras, rellenos, pigmentos y otros materiales similares que mejoran aún más sus propiedades. Entre los plásticos se encuentran los termoplásticos, termoestables y elastómeros (naturales o sintéticos). En este libro se utilizan indistintamente los términos plástico o polímero.

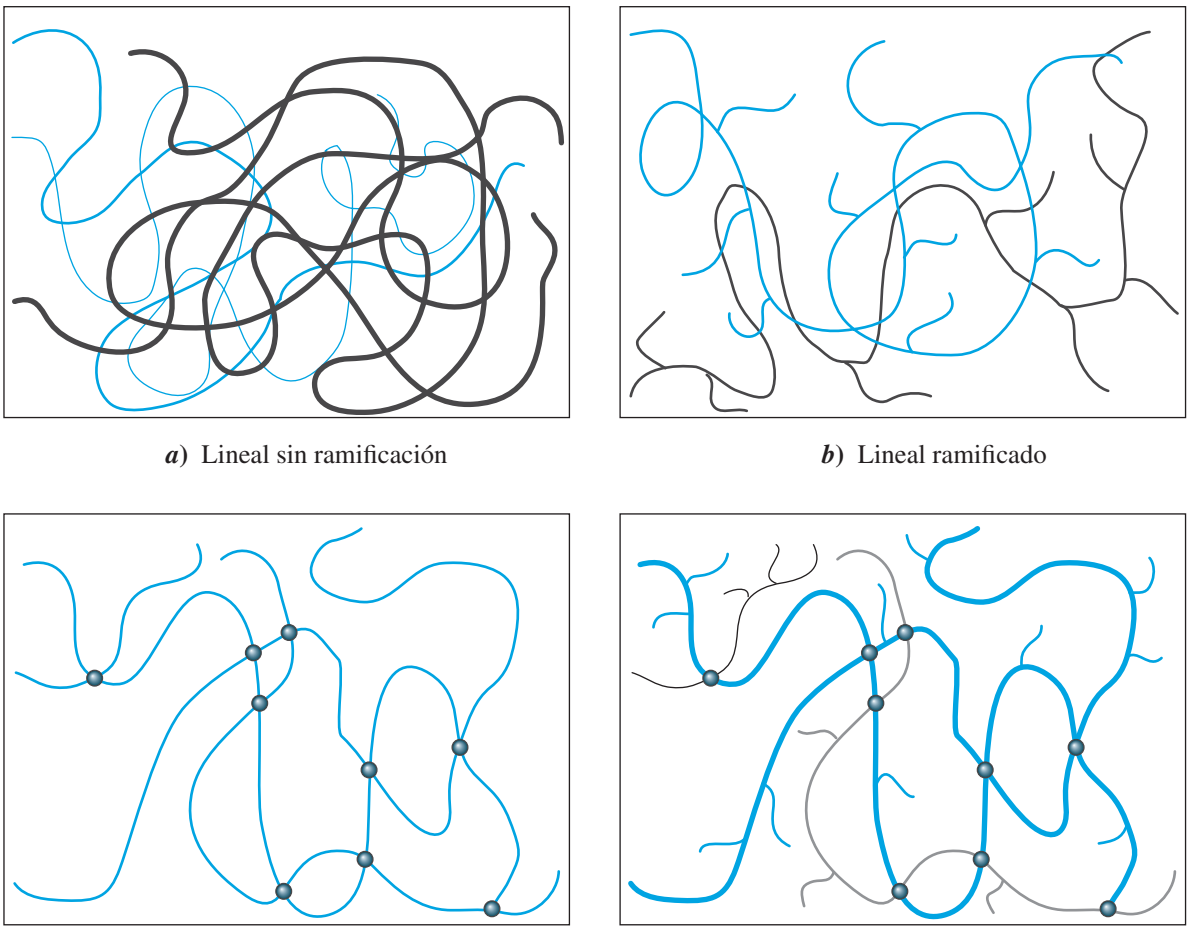
Los plásticos se usan en una gran cantidad de aplicaciones que incluyen prendas de vestir, juguetes, enseres domésticos, elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, adhesivos, neumáticos para automóviles, materiales biomédicos, defensas e interiores para automóviles, espumas y empaques. Los polímeros se usan con frecuencia en materiales compuestos, tanto en forma de fibras como de matriz. Las pantallas de cristal líquido (LCD) se fabrican a base de polímeros. También se usan polímeros en lentes fotocromáticos. Los plásticos también se usan para fabricar componentes electrónicos debido a su capacidad aislante y a su constante dieléctrica baja. Recientemente se han logrado adelantos significativos en el área de dispositivos electrónicos flexibles basados en las propiedades útiles de piezoelectricidad, semiconductividad, óptica y electroóptica que se encuentran en algunos polímeros. Los polímeros como el acetato de polivinilo (PVA) son solubles en agua. Muchos de estos polímeros se pueden disolver en agua o en solventes orgánicos para usarse como aglutinantes, surfactantes o plastificantes en el procesamiento de materiales cerámicos, semiconductores y como aditivos para muchos productos de consumo. El butiral polivinilo (PVB), un polímero, forma parte de los vidrios laminados que se usan en parabrisas de automóviles (capítulo 15). Posiblemente los polímeros se usan en más campos de actividad tecnológica que cualquier otra clase de materiales.

Los *polímeros comerciales*, o *materias primas estándar*, son materiales ligeros, resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez, y no son adecuados para usarse a altas temperaturas. No obstante, estos polímeros son relativamente económicos y se pueden moldear con gran facilidad en una enorme diversidad de formas, desde bolsas de plástico y engranajes mecánicos hasta tinas de baño. Los *polímeros ingenieriles* son diseñados para brindar mejor resistencia o mayor rendimiento a altas temperaturas. Estos materiales se producen en cantidades relativamente pequeñas y suelen ser costosos. Algunos de los polímeros ingenieriles pueden soportar temperaturas hasta de 350°C; otros, como las fibras, tienen resistencias superiores a las del acero.

Los polímeros también tienen numerosas propiedades físicas útiles. Algunos, como los acrílicos Plexiglás^{MR} y la Lucita^{MR}, son transparentes y pueden reemplazar al vidrio. Aun cuando la mayoría de los polímeros son aislantes eléctricos, ciertos polímeros especiales (como los acetales) y los materiales compuestos a base polímero poseen una conductividad eléctrica útil. El teflón tiene un bajo coeficiente de fricción y es el recubrimiento que se emplea en utensilios antiadherentes de cocina. Los polímeros también resisten la corrosión y el ataque químico.

16-1 Clasificación de los polímeros

Los polímeros se clasifican de varias formas: según la síntesis de sus moléculas, su estructura molecular o por la familia química a la que pertenecen. Una manera de clasificar los polímeros es establecer si se trata de un **polímero lineal** o de un **polímero ramificado** (figura 16-1). Un polímero lineal está formado de cadenas moleculares en forma de espagueti. En un polímero ramificado hay cadenas primarias de polímero y cadenas secundarias más pequeñas (ramales) que nacen de las cadenas principales. Observe que aun cuando se hace referencia a "lineales", en realidad las cadenas no tienen formas de líneas rectas. Una manera más adecuada de describir los polímeros es en función de su comportamiento mecánico y térmico. En la tabla 16-1 se comparan las tres categorías principales de polímeros.



a) Lineal sin ramificación

b) Lineal ramificado

c) Termoestable sin ramificación

d) Termoestable ramificado

Figura 16-1 Esquema que muestra polímeros lineales y ramificados. Observe que la ramificación puede ocurrir en cualquier tipo de polímero (por ejemplo, termoplásticos, termoestables y elastómeros). *a*) Polímero lineal no ramificado: note que las cadenas no forman líneas rectas y no están conectadas. Se muestran distintas cadenas poliméricas mediante diferentes tonos y diseños para indicar de manera clara que cada una de las cadenas no está conectada con otra. *b*) Polímero lineal ramificado: las cadenas no están conectadas pero tienen ramas. *c*) Polímero termoestable sin ramificación: las cadenas están conectadas entre sí mediante enlaces covalentes, pero no tienen ramificación. Los puntos de unión se resaltan mediante círculos sólidos. *d*) Polímero termoestable que tiene ramificación y cadenas interconectadas mediante enlaces covalentes. Las cadenas y ramificaciones distintas aparecen en diferentes tonos para distinguirlas con mayor claridad. Los sitios donde las cadenas están realmente enlazadas se representan con círculos sólidos.

Los **termoplásticos** están formados de cadenas largas que se producen al unir monómeros; por lo general, se comportan de manera plástica y dúctil. Las cadenas pueden o no estar ramificadas. Las cadenas individuales están entrelazadas. Entre los átomos de cadenas diferentes existen enlaces de van der Waals relativamente débiles. Esto se asemeja a algunos árboles agrupados. Los árboles pueden o no tener ramas, cada uno de ellos es independiente y no tiene contacto con ningún otro. En los termoplásticos, las cadenas pueden desenlazarse mediante un esfuerzo de tensión. Los termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos. Al calentarse, se ablandan y funden. Se procesan en ciertas formas calentándolos a altas temperaturas. Los termoplásticos se pueden reciclar con facilidad.

Los **polímeros termoestables** están constituidos por cadenas largas (lineales o ramificadas) de moléculas fuertemente unidas por enlaces cruzados y entrelazados para formar estructuras tridimensionales de red. Los polímeros de red o termoestables se parecen a un manojo de hilos que están tejidos entre sí en varios sitios y no sólo enmarañados. Cada hilo puede tener otros hilos laterales unidos a él. Los plásticos termoestables por lo general son fuertes, pero más frágiles que los termo-

Tabla 16-1 Comparación de las tres categorías de polímeros

Comportamiento	Estructura general	Ejemplo
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles (con o sin ramificación)	Polietileno
Termoestable	Red rígida tridimensional (las cadenas pueden ser lineales o ramificadas)	Poliuretanos
Elastómeros	Termoplásticos o termoestables ligeramente entrelazados; consisten de moléculas semejantes a resortes	Caucho natural

plásticos. Los termoestables no se funden al calentarlos sino que comienzan a descomponerse. No pueden ser reprocesados con facilidad después de que haya ocurrido la reacción de enlaces cruzados y, por lo tanto, el reciclaje es difícil.

Los **elastómeros** tienen una deformación elástica superior a 200%. Es posible que se trate de termoplásticos o de termoestables ligeramente entrelazados. Las cadenas poliméricas tienen forma de moléculas en espiral que pueden estirarse de manera reversible al ser sometidos a una fuerza. Los elastómeros también reciben el nombre de cauchos.

Los **elastómeros termoplásticos** son un grupo especial de polímeros; su procesamiento es tan fácil como el de los termoplásticos y su comportamiento elástico es semejante al de los elastómeros.

Estructuras representativas

La figura 16-2 muestra tres posibles maneras de representar un segmento de polietileno, el más simple de los termoplásticos. La cadena polimérica está formada de una cadena principal o columna vertebral de átomos de carbono; dos átomos de hidrógeno están enlazados a cada uno de los átomos de carbono de la cadena. El ángulo entre los dos enlaces H asociado a un átomo C determinado es de 109.5°. La cadena se tuerce y gira en el espacio. Como se aprecia en la figura, el polietileno no muestra ramificaciones, por lo que se trata de un termoplástico lineal. El modelo simple en dos dimensiones de la figura 16-2*c*) incluye los elementos esenciales de la estructura del polímero y se utilizará para describir los diversos polímeros. Las líneas sencillas (—) entre ambos átomos de carbono y entre átomos de carbono e hidrógeno representan

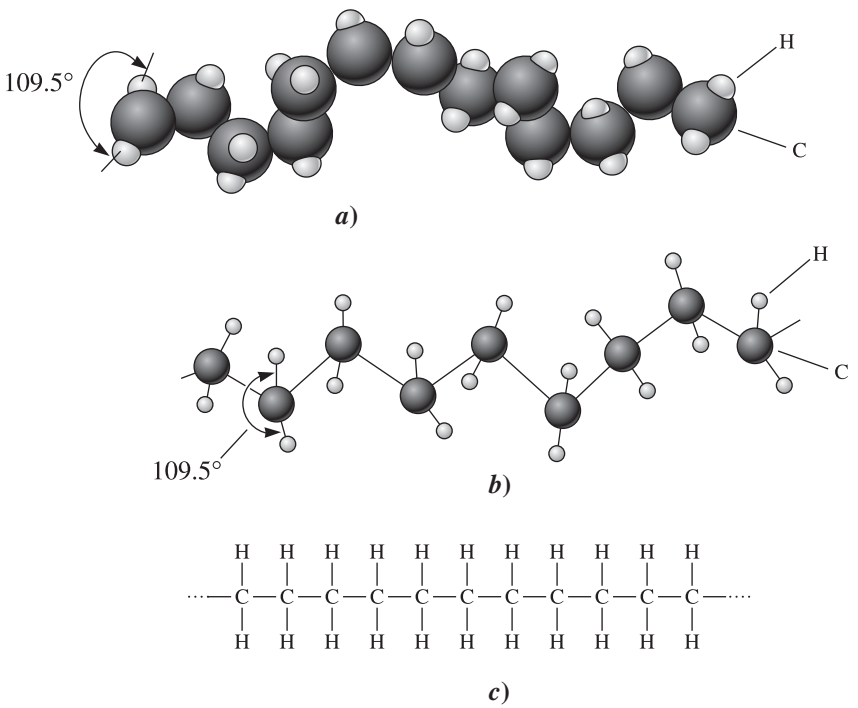


Figura 16-2 Tres formas de representar la estructura del polietileno: *a*) un modelo tridimensional sólido, *b*) un modelo tridimensional "espacial" y *c*) un modelo bidimensional simple.

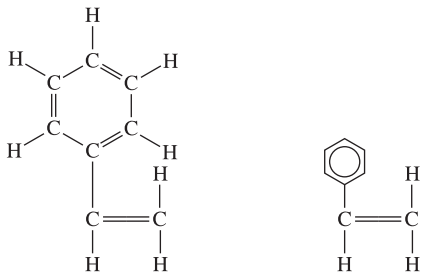


Figura 16-3 Dos formas de representar el anillo de benceno. En este caso, el anillo aparece conectado a un par de átomos de carbono, lo que produce estireno.

un enlace covalente simple. Dos líneas paralelas (=) representan enlaces covalentes dobles entre átomos. Varios polímeros tienen estructuras en anillo, como el anillo de benceno, que se encuentra en el poliestireno y otros polímeros (figura 16-3). Las moléculas que contienen el anillo de benceno de seis miembros se conocen como aromáticas.

En la estructura que se ilustra en la figura 16-2*c*), si se reemplaza uno de los átomos de hidrógeno en C_2H_4 con CH_3, un anillo de benceno, o cloro, se obtiene la estructura del polipropileno, del poliestireno y del cloruro de polivinilo (PVC), respectivamente. Si en los grupos C_2H_4 se sustituyen todos los átomos H con flúor (F), se obtiene la estructura del politetrafluoretileno, es decir, teflón. Muchas estructuras poliméricas pueden derivarse a partir de la estructura del polietileno. El siguiente ejemplo muestra cómo se utilizan los diferentes tipos de polímeros.

Ejemplo 16-1 ***Diseño/selección de materiales para componentes poliméricos***

Diseñe el tipo de material polimérico que seleccionaría para las siguientes aplicaciones: guantes quirúrgicos, un envase para bebidas y una polea.

SOLUCIÓN

El guante debe tener gran elasticidad a fin de poder deslizarse con facilidad en la mano del cirujano, y además debe adaptarse al contorno de la mano para permitir la máxima sensación táctil durante la cirugía. Un material con grandes deformaciones elásticas, en particular ante un esfuerzo relativamente pequeño, puede ser apropiado, lo que constituye la principal característica de un elastómero.

El envase para bebidas debe fabricarse de manera fácil y económica. Debe tener cierta ductilidad y tenacidad a fin de que no se rompa ni deje escapar el contenido. Si la bebida es gaseosa, una preocupación importante sería la difusión del CO_2 (capítulo 5). Un termoplástico, como el tereftalato de polietileno (PET), tendrá la ductilidad y formabilidad necesarias para esta aplicación. También puede reciclarse con facilidad.

La polea deberá estar sujeta a algún esfuerzo y desgaste conforme la banda se desliza sobre ella. Se requiere un material relativamente resistente, rígido y duro para evitar el desgaste, por lo que un polímero termoestable podría resultar el más apropiado.

16-2 Polimerización por adición y condensación

La polimerización por **adición** y **condensación** son las dos principales maneras de crear un polímero. Los polímeros resultantes de estos procesos se conocen como polímeros por adición y polímeros por condensación, respectivamente. La formación del polímero más común, el polietileno (PE), a partir de moléculas de etileno es un ejemplo de polimerización por adición, es decir, por crecimiento de cadenas. El etileno, que es un gas, es el monómero (unidad individual), cuya fórmula es C_2H_4. Los dos átomos de carbono están unidos por un enlace covalente doble. Cada átomo de carbono comparte dos de sus electrones con el otro átomo de carbono, y dos átomos de hidrógeno están enlazados de manera covalente con cada uno de los átomos de carbono (figura 16-4).

En presencia de una combinación apropiada de calor, presión y catalizadores, se rompe el enlace doble entre los átomos de carbono y es reemplazado por un enlace covalente simple. Los extre-

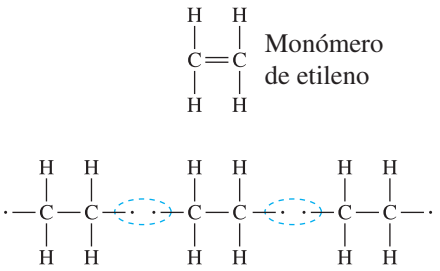


Figura 16-4 Reacción de adición para producir polietileno a partir de moléculas de etileno. El enlace doble no saturado del monómero se deshace para producir sitios activos, los cuales atraen posteriormente unidades de repetición adicionales a cualquiera de sus extremos para crear una cadena.

mos del monómero son ahora *radicales libres*; cada átomo de carbono tiene un electrón sin pareja que puede compartir con otros radicales libres. La polimerización por adición ocurre debido a que el monómero original posee un enlace covalente doble entre los átomos de carbono. El enlace doble es un **enlace no saturado**. Después de su transformación a un enlace simple, los átomos de carbono todavía están unidos, pero se convierten en activos; se pueden agregar otras **unidades de repetición** o meros para producir la cadena polimérica.

Terminación de la polimerización por adición

Este proceso requiere polímeros con peso molecular promedio y distribución de peso molecular controlados. Por lo tanto, las reacciones de polimerización deberán tener algún interruptor para "apagarla". Las cadenas pueden terminarse mediante dos mecanismos (figura 16-5). Primero, los extremos de dos cadenas pueden unirse. Este proceso, conocido como *combinación*, crea una sola cadena larga a partir de dos más cortas. Segundo, el extremo activo de una de las cadenas puede remover un átomo de hidrógeno de una segunda cadena mediante un proceso conocido como *desproporcionación*. Esta reacción termina dos cadenas en vez de combinarlas en una más grande. A veces se agregan compuestos químicos, conocidos como terminadores, para concluir las reacciones de polimerización. Por lo general, en los materiales termoplásticos, cuanto mayor sea el peso molecular promedio, más alta será la temperatura de fusión y mayor el módulo de Young del polímero. El siguiente ejemplo ilustra una reacción de polimerización por adición.

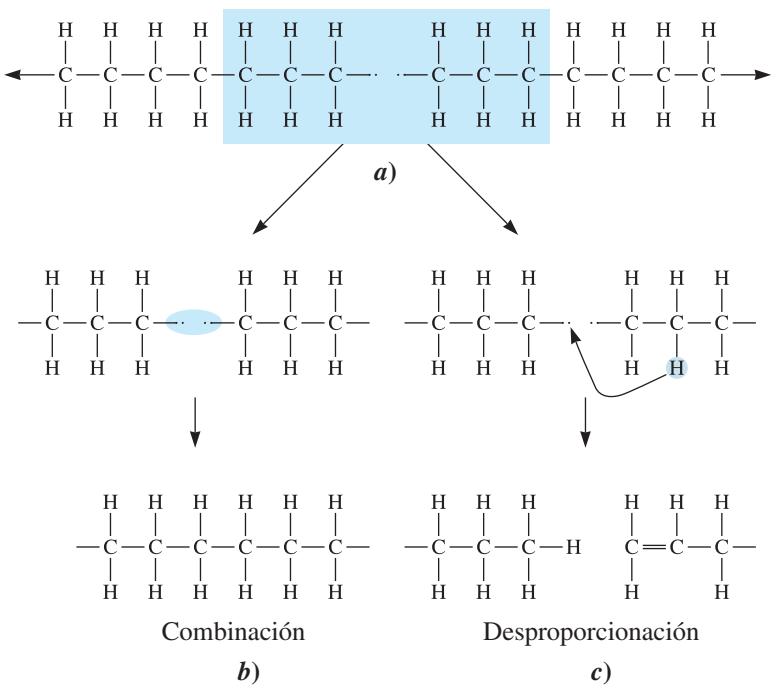


Figura 16-5 Terminación del crecimiento de cadenas de polietileno: *a*) los extremos activos de dos cadenas se acercan entre sí, *b*) las dos cadenas sufren una combinación y forman una cadena larga, y *c*) el reordenamiento de un átomo de hidrógeno y la creación de un enlace covalente doble por desproporcionación causa la terminación de dos cadenas.

Ejemplo 16-2 *Cálculo del iniciador requerido*

Calcule la cantidad del iniciador de peróxido de benzoílo $[(C_6H_5CO)_2O_2]$ que se requiere para producir 1 kg de polietileno con un peso molecular promedio de 200,000 g/mol. Cada molécula de peróxido de benzoílo produce dos radicales libres, cada uno de los cuales es capaz de iniciar una cadena de polietileno. Suponga que 20% del iniciador en realidad es eficiente y que todas las terminaciones ocurren por el mecanismo de combinación.

SOLUCIÓN

Una molécula de peróxido de benzoílo produce dos radicales libres que inician dos cadenas que luego se combinan para formar una cadena de polietileno. En esta forma, hay una relación de 1:1 entre las moléculas de peróxido de benzoílo y las cadenas de polietileno. Si el iniciador fuera 100% efectivo, se requeriría una molécula de peróxido de benzoílo por cada cadena de polietileno. Para determinar la cantidad de peróxido de benzoílo que se requiere, debe calcularse el número de cadenas con un peso molecular de 200,000 g/mol en 1 kg de polietileno.

Peso molecular del etileno = (2 átomos de C)(12 g/mol)+(4 átomos de H) (1 g/mol)= 28 g/mol. El número de moléculas por cadena (también conocido como grado de polimerización) está dado por

$$\frac{200{,}000 \text{ g/mol}}{28 \text{ g/mol}} = 7143 \text{ moléculas de etileno por cadena}$$

El número total de monómeros requerido para formar 1 kg de polietileno es

$$\frac{(1000 \text{ g})(6.022 \times 10^{23} \text{ monómeros/mol})}{28 \text{ g/mol}} = 2.15 \times 10^{25} \text{ monómeros}$$

Entonces, el número de cadenas de polietileno en 1 kg es

$$\frac{2.15 \times 10^{25} \text{moléculas de etileno}}{7143 \text{ moléculas de etileno por cadena}} = 3.0 \times 10^{21} \text{ cadenas}$$

Como el iniciador de peróxido de benzoílo es sólo 20% eficiente, se requieren $5(3.0 \times 10^{21}) = 1.5 \times 10^{22}$ moléculas de peróxido de benzoílo para iniciar 3.0×10^{21} cadenas. El peso molecular del peróxido de benzoílo es (14 átomos de C)(12 g/mol)+ (10 átomos de H)(1 g/mol)+ (4 átomos de O)(16 g/mol) = 242 g/mol. Así, la cantidad de iniciador requerido es

$$\frac{1.5 \times 10^{22} \text{ moléculas (242 g/mol)}}{6.022 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol}} = 6.0 \text{ g}$$

Polimerización por condensación

Las cadenas poliméricas también pueden formarse mediante reacciones de condensación, o polimerización de *crecimiento por pasos*, produciendo estructuras y propiedades parecidas a las de los polímeros por adición. En la polimerización por condensación se forma una molécula relativamente pequeña (por ejemplo, agua, etanol, metanol, etc.), como resultado de la reacción de polimerización. Este mecanismo puede incluir diferentes monómeros como moléculas de inicio o precursoras. Un ejemplo importante es la polimerización del dimetiltereftalato y del etilenglicol (que también se usa como refrigerante en los radiadores de automóviles) para la producción del *poliéster* (figura 16-6). Durante la polimerización se combina un átomo de oxígeno del extremo del monómero del etilenglicol con un grupo OCH_3 (metoxi) proveniente del dimetiltereftalato. Como subproducto se "condensa" alcohol metílico (CH_3OH), y los dos monómeros se combinan para producir una molécula más grande. Cada uno de los monómeros es bifuncional, lo cual significa que pueden reaccionar ambos extremos del monómero, y la polimerización por condensación puede continuar por la misma reacción. Finalmente, se produce una cadena larga de polímero, es decir, un poliéster. La longitud de la cadena polimérica depende de la facilidad con que los monómeros pueden difundirse hacia los extremos y someterse a la reacción por condensación. El crecimiento de la cadena cesa cuando ya no llegan más monómeros a sus extremos para que continúe la reacción. También pueden ocurrir reacciones de polimerización por condensación en el proceso sol-gel de los materiales cerámicos.

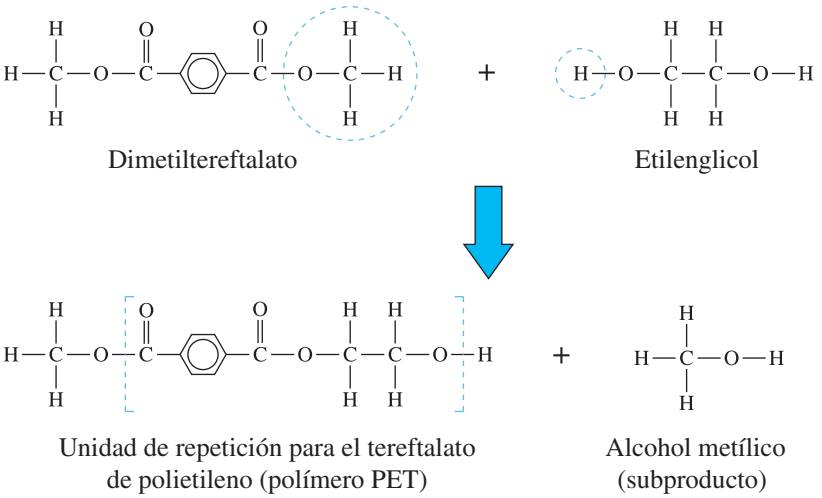


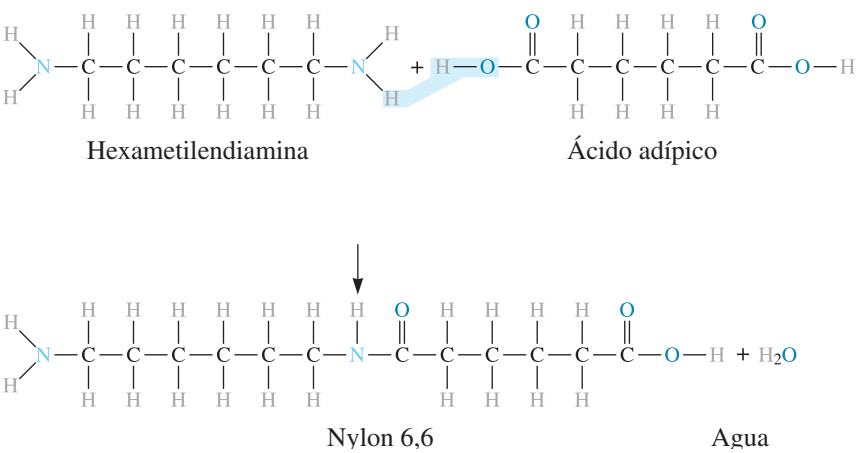
Figura 16-6 Reacción por condensación para el tereftalato de polietileno (PET), un poliéster común. De los monómeros se eliminan el grupo OCH_3 y un átomo de hidrógeno, lo que permite la unión de ambos monómeros y la producción de alcohol metílico como subproducto.

El siguiente ejemplo describe el descubrimiento del nylon, así como los cálculos relacionados con su polimerización por condensación.

Ejemplo 16-3 *Polimerización por condensación del nylon 6,6*

En 1934, Wallace Hume Carothers, de DuPont^{MR}, reportó por primera vez el descubrimiento del nylon. En 1939, Charles Stine, también de DuPont^{MR}, presentó esta fibra sintética ante un grupo de 3000 mujeres reunidas en ocasión de la Feria Mundial de Nueva York. Su primera aplicación fue en medias, que resultaron ser verdaderamente resistentes. Hoy el nylon se usa en cientos de aplicaciones. Antes del nylon, Carothers había descubierto el neopreno (un elastómero).

El nylon 6,6 es un polímero lineal que se produce al combinar 1000 g de hexametilendiamina con ácido adípico. El polímero se produce luego de una reacción de condensación. Las estructuras moleculares de los monómeros se muestran a continuación. La cadena lineal del nylon se produce cuando un átomo de hidrógeno, de la diamina de hexametileno, se combina con un grupo OH del ácido adípico para formar una molécula de agua.



Observe que la reacción puede continuar en ambos extremos de la nueva molécula, por lo que es posible formar cadenas largas. Este polímero se llama nylon 6,6 porque ambos monómeros contienen seis átomos de carbono.

¿Cuántos gramos de ácido adípico se necesitan y cuánto nylon 6,6 se produce, si se supone una eficiencia de 100%?

SOLUCIÓN

Los pesos moleculares de la hexametilendiamina, del ácido adípico y del agua son 116, 146 y 18 g/mol, respectivamente. El número de moles de hexametilendiamina es igual al número de moles de ácido adípico:

$$\frac{1000\text{ g}}{116\text{ g/mol}} = 8.62\text{ moles} = \frac{x\text{ g}}{146\text{ g/mol}}$$

$$x = \text{se requieren } 1259\text{ g de ácido adípico}$$

Se pierde una molécula de agua cuando la hexametilendiamina reacciona con el ácido adípico. Cada vez que se agrega un monómero a la cadena, se pierde una molécula de agua. Entonces, cuando se forma una cadena larga, hay (en promedio) dos moléculas de agua liberadas por cada unidad de repetición de la cadena (cada unidad de repetición formada a partir de dos monómeros). De este modo, el número de moles de agua perdidos es 2 (8.62 moles) = 17.24 moles, es decir,

$$17.24\text{ moles } H_2O\ (18\text{ g/mol}) = 310\text{ g } H_2O$$

La cantidad total producida de nylon es

$$1000\text{ g} + 1259\text{ g} - 310\text{ g} = 1949\text{ g} = 1.95\text{ kg}$$

16-3 Grado de polimerización

Los polímeros, a diferencia de los compuestos químicos orgánicos o inorgánicos, no tienen un peso molecular fijo. Por ejemplo, el polietileno puede tener un peso molecular desde ~ 25,000 hasta 6 millones de g/mol. La longitud promedio de un polímero lineal está representada por el **grado de polimerización**, es decir, el número de unidades de repetición existentes en la cadena. El grado de polimerización también se puede definir como

$$\text{Grado de polimerización} = \frac{\text{peso molecular promedio del polímero}}{\text{peso molecular de la unidad de repetición}} \tag{16-1}$$

Si el polímero sólo contiene un tipo de monómero, el peso molecular de la unidad de repetición es el del monómero; si el polímero contiene dos o más tipos de monómeros, el peso molecular de la unidad de repetición será la suma de los pesos moleculares de los monómeros, menos el peso molecular del subproducto.

Las longitudes de las cadenas en un polímero lineal varían de forma considerable. Algunas pueden ser muy cortas debido a una terminación temprana, y otras pueden resultar excepcionalmente largas. Se puede definir el peso molecular promedio de dos formas.

El *peso molecular promedio en peso* se obtiene al dividir las cadenas en intervalos de tamaño y determinar la fracción de las cadenas con pesos moleculares dentro de dicho intervalo. El peso molecular promedio en peso $\overline{M}_w$ es

$$\overline{M}_w = \sum f_i M_i \tag{16-2}$$

donde M_i es el peso molecular medio de cada intervalo y f_i la fracción en peso del polímero con cadenas dentro de este intervalo.

El *peso molecular promedio por números* $\overline{M}_n$ se basa en la fracción numérica más que en la fracción en peso de las cadenas dentro de cada intervalo de tamaños. Siempre es menor que el peso molecular promedio en peso y está dado por

$$\overline{M}_n = \sum x_i M_i \tag{16-3}$$

donde M_i es otra vez el peso molecular medio de cada intervalo, pero x_i es la fracción del número total de cadenas dentro de cada intervalo. Se puede utilizar de manera indistinta $\overline{M}_w$ o $\overline{M}_n$ para calcular el grado de polimerización.

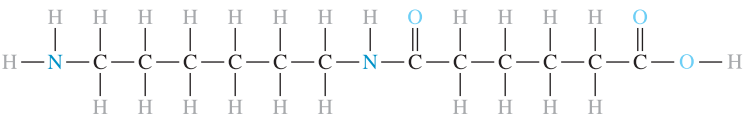
Los dos ejemplos siguientes ilustran estos conceptos.

Ejemplo 16-4 *Grado de polimerización para el nylon 6,6*

Calcule el grado de polimerización si el nylon 6,6 tiene un peso molecular de 120,000 g/mol.

SOLUCIÓN

La reacción mediante la cual se produce el nylon 6,6 se describe en el ejemplo 16-3. La hexametilendiamina se combina con el ácido adípico y libera una molécula de agua. Cuando se forma una cadena larga, en promedio existe una molécula de agua liberada por cada molécula en reacción. Los pesos moleculares son 116 g/mol para la hexametilendiamina, 146 g/mol para el ácido adípico y 18 g/mol para el agua. La unidad de repetición para el nylon 6,6 es



El peso molecular de la unidad de repetición es la suma de los pesos moleculares de los dos monómeros, menos el correspondiente a las dos moléculas de agua resultantes:

$$M_{\text{unidad de repetición}} = 116 + 146 - 2(18) = 226 \text{ g/mol}$$

$$\text{Grado de polimerización} = \frac{120{,}000 \text{ g/mol}}{226 \text{ g/mol}} = 531$$

El grado de polimerización se refiere al número total de unidades de repetición existentes en la cadena.

Ejemplo 16-5 *Pesos moleculares promedio en peso y por número*

Se tiene una muestra de polietileno que contiene 4000 cadenas con pesos moleculares entre 0 y 5000 g/mol, 8000 cadenas con pesos moleculares entre 5000 y 10,000 g/mol, 7000 cadenas con pesos moleculares entre 10,000 y 15,000 g/mol y 2000 cadenas con pesos moleculares entre 15,000 y 20,000 gmol. Determine el peso molecular promedio tanto por número como en peso.

SOLUCIÓN

Primero es necesario determinar la fracción numérica x_i y la fracción en peso f_i para cada uno de los cuatro intervalos. En el caso de x_i, simplemente se divide el número en cada intervalo entre 21,000, que es el número total de cadenas. Para determinar f_i, primero se multiplica el número de cadenas por el peso molecular promedio de las mismas en cada intervalo, con lo que se obtiene el "peso" de cada grupo, y después se obtiene f_i al dividir el peso total de 1.925×10^8 g/mol. Para determinar los pesos moleculares pueden utilizarse las ecuaciones 16-2 y 16-3.

Número de cadenas	M medio por cadena (g/mol)	x_i	$x_i M_i$ (g/mol)	Peso (g/mol)	f_i	$f_i M_i$ (g/mol)
4000	2500	0.191	477.5	1.0×10^7	0.0519	129.75
8000	7500	0.381	2857.5	6.0×10^7	0.3118	2338.50
7000	12,500	0.333	4162.5	8.75×10^7	0.4545	5681.25
2000	17,500	0.095	1662.5	3.5×10^7	0.1818	3181.50
$\Sigma = 21{,}000$		$\Sigma = 1$	$\Sigma = 9160$	$\Sigma = 1.925 \times 10^8$	$\Sigma = 1$	$\Sigma = 11.331$

$$\overline{M}_n = \sum x_i M_i = 9160 \text{ g/mol}$$

$$\overline{M}_w = \sum f_i M_i = 11{,}331 \text{ g/mol}$$

El peso molecular promedio en peso es mayor que el peso molecular promedio por número de cadenas.

16-4 Termoplásticos comunes

Algunas de las propiedades mecánicas de los termoplásticos comunes aparecen en la tabla 16-2. La tabla 16-3 muestra las unidades de repetición y aplicaciones para varios termoplásticos formados por polimerización por adición.

Termoplásticos con estructuras complejas

Un gran número de polímeros, que en general se utilizan en aplicaciones especiales y en cantidades relativamente pequeñas, se forma a partir de monómeros complejos y con frecuencia mediante el mecanismo de condensación. En la cadena pueden incorporarse el oxígeno, el nitrógeno, el azufre y anillos de benceno (o grupos aromáticos). En la tabla 16-4 se muestran las unidades de repetición y las aplicaciones comunes para varios de estos polímeros complejos. El polioximetileno, es decir, el

Tabla 16-2 Propiedades de termoplásticos seleccionados

	Resistencia a la tensión (MPa)	% alargamiento	Módulo elástico (MPa)	Densidad (g/cm^3)	Impacto Izod (J/cm)
Polietileno (PE):					
Baja densidad	21	800	276	0.92	4.9
Alta densidad	38	130	1241	0.96	2.2
Peso molecular ultraalto	48	350	690	0.934	16.2
Cloruro de polivinilo (PVC)	62	100	4140	1.40	
Polipropileno (PP)	41	700	1517	0.90	0.5
Poliestireno (PS)	55	60	3103	1.06	0.2
Poliacrilonitrilo (PAN)	62	4	4000	1.15	2.6
Polimetilmetacrilato (PMMA) (acrílico, plexiglás)	83	5	3100	1.22	0.3
Policlorotrifluoroetileno	41	250	2070	2.15	1.4
Politetrafluoretileno (PTFE, teflón)	48	400	550	2.17	1.6
Polioximetileno (POM) (acetal)	83	75	3590	1.42	1.2
Poliamida (PA) (nylon)	83	300	3450	1.14	1.1
Poliéster (PET)	72	300	4140	1.36	0.3
Policarbonato (PC)	76	130	2760	1.20	8.6
Poliimida (PI)	117	10	2070	1.39	0.8
Polietereterketona (PEEK)	70	150	3790	1.31	0.9
Sulfuro de polifenileno (PPS)	66	2	3310	1.30	0.3
Sulfona de poliéter (PES)	84	80	2410	1.37	0.9
Poliamidaimida (PAI)	186	15	5030	1.39	2.2

Tabla 16-3 Unidades de repetición y aplicaciones de termoplásticos por adición seleccionadas

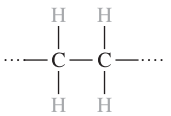
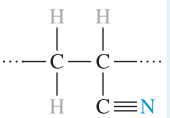
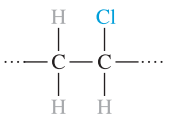
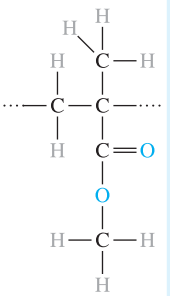
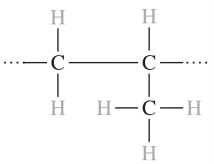
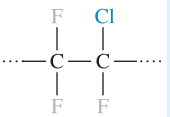
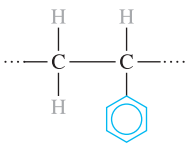
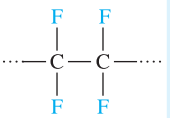
Polímero	Unidad de repetición	Aplicación	Polímero	Unidad de repetición	Aplicación
Polietileno (PE)		Películas de empaque, aislamientos para alambre, botellas comprimibles, tuberías, artículos para el hogar.	Poliacrilontrilo (PAN)		Fibras textiles, precursores para fibras de carbono, recipientes para alimentos.
Cloruro de polivinilo (PVC)		Tuberías, válvulas, acoplamientos, loseta vinílica, aislamientos para alambres, techos de vinilo para automóviles.	Piolimetilmetacrilato (PMMA) (acrílico plexiglás)		Ventanas, parabrisas, recubrimientos, lentes de contacto duros, señalamientos iluminados.
Polipropileno (PP)		Depósitos, fibras para alfombras, cuerdas, empaques.	Policlortrifluoretileno		Componentes de válvulas, juntas, tuberías, aislamiento eléctrico.
Poliestireno (PS)		Empaques y espumas aislantes, paneles de iluminación, componentes de aparatos, empaques para huevo.	Polietrafluoretileno (teflón)(PTFE)		Sellos, válvulas, recubrimientos antiadherentes.

Tabla 16-4 Unidades de repetición y aplicaciones termoplásticas complejas

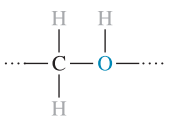
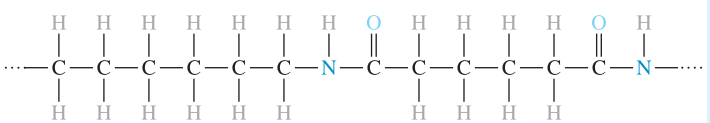
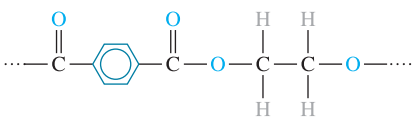
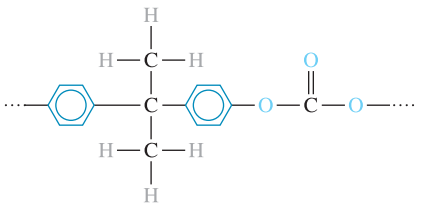
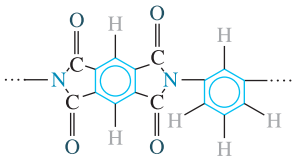
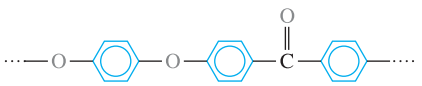
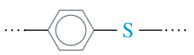
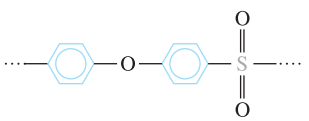
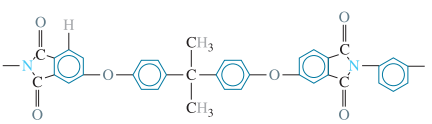
Polímero	Unidad de repetición	Aplicaciones
Polioximetileno (acetal)(POM)		Accesorios de plomería, bolígrafos, cojinetes, engranes, aspas de ventilador.
Poliamida (nylon)(PA)		Cojinetes, engranes, fibras, cuerdas, componentes para autos, componentes eléctricos.
Poliéster (PET)		Fibras, película fotográfica, cintas para grabación, bolsas para hervir líquidos, recipientes para bebidas.

Tabla 16-4 Unidades de repetición y aplicaciones termoplásticas complejas *(continuación)*

Polímero	Unidad de repetición	Aplicaciones
Policarbonato (PC)		Carcasas eléctricas y aparatos domésticos, componentes para automóviles, cascos para futbolistas, botellas retornables, discos compactos (CD), DVD.
Polimida (PI)		Adhesivos, tableros de circuitos, cables flexibles.
Polietereterketona (PEEK)		Aislamiento eléctrico y recubrimientos de alta temperatura.
Sulfuro de polifenileno (PPS)		Recubrimientos, componentes para manejo de fluidos, componentes electrónicos, componentes para secadoras de pelo.
Sulfona de poliéster (PES)		Componentes eléctricos, cafeteras, secadoras de cabello, componentes para hornos de microondas.
Poliamidaimida (PAI)		Componentes electrónicos, aplicaciones en las industrias aeroespacial y automotriz.

acetal, es un ejemplo sencillo en el que la columna vertebral de la cadena polimérica contiene átomos alternados de carbono y de oxígeno. Varios de estos polímeros, e incluso las poliimidas y el polietereterketona (PEEK), son materiales de gran importancia en la industria aeroespacial. Debido a que el enlace dentro de las cadenas es más fuerte en comparación con los polímeros por adición, que son más sencillos, la rotación y el deslizamiento de las cadenas es más difícil, con lo que se obtiene mayor resistencia y rigidez, así como puntos de fusión más altos. En algunos casos es posible obtener buenas propiedades al impacto a partir de estas cadenas complejas, en las que los policarbonatos son particularmente importantes. Los policarbonatos (Lexan^{MR}, Merlon^{MR} y Sparlux^{MR}) se usan en la construcción de ventanas a prueba de balas, discos compactos para almacenar información, DVD y en numerosas aplicaciones.

16-5 Relaciones estructura-propiedades en termoplásticos

Grado de polimerización

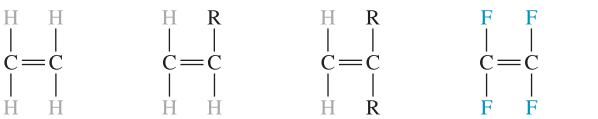
En general, para un tipo determinado de termoplástico (por ejemplo, polietileno) aumenta la resistencia a la tensión, a la termofluencia, al impacto, al

desgaste y a la temperatura de fusión al incrementarse el peso molecular promedio o el grado de polimerización. Los incrementos en estas propiedades no son lineales. Conforme aumenta el peso molecular promedio se incrementa la temperatura de fusión, lo que hace más difícil el procesamiento. De hecho, es posible utilizar una distribución bimodal del peso molecular en el procesamiento del polímero. Un componente tiene menor peso molecular y contribuye a la fusión, lo cual facilita el procesamiento.

Efecto de los grupos laterales

En el polietileno, las cadenas lineales giran y se deslizan con facilidad al aplicar un esfuerzo, y no se forman enlaces polares fuertes entre las cadenas; por lo tanto, el polietileno tiene baja resistencia.

Uno de los átomos de hidrógeno de los *compuestos de vinilo* se sustituye por un átomo o grupo de átomos diferente. En el grupo lateral, cuando R es cloro, se produce cloruro de polivinilo (PVC); cuando el grupo lateral es CH_3, se produce polipropileno (PP); la adición de un anillo de benceno da por resultado poliestireno (PS), y un grupo CN produce poliacrilonitrilo (PAN). (Vea la tabla 16-3.)



Cuando se sustituyen dos de los átomos de hidrógeno, el monómero es un *compuesto de vinilideno*; ejemplos importantes de éste incluyen al cloruro de polivinilideno (base para el Saran Wrap[MR]) y al metacrilato de polimetilo (acrílicos como Lucita[MR] y Plexiglás[MR]). En general, resulta una distribución de cabeza a cola de las unidades de repetición en los polímeros (figura 16-7), siendo dicha distribución la más común.

El efecto de agregar otros átomos o grupos de átomos a la espina dorsal de carbono, en sustitución de átomos de hidrógeno, se ilustra en las propiedades comunes incluidas en la tabla 16-2. Los átomos grandes, como el cloro, o los grupos de átomos como el metilo (CH_3) y el benceno, dificultan la rotación de las cadenas, su estirado, desenmarañado y deformado por flujo viscoso al aplicarse un esfuerzo o al aumentar la temperatura. Esta situación da por resultado una mayor resistencia, rigidez y una mayor temperatura de fusión que las del polietileno. El átomo de cloro en el PVC y el grupo de carbono-nitrógeno en el PAN son fuertemente atraídos por uniones hidrógeno con los átomos de hidrógeno de cadenas adyacentes. Esta es la razón por la que el PVC es más rígido que muchos otros polímeros. Una manera de evitar la rigidez del PVC es agregar materiales compuestos de bajo peso molecular como los ésteres de ftalato, conocidos como plastificantes. Cuando el PVC contiene estos materiales compuestos, se reduce la temperatura de transición vítrea. Con ello el PVC se vuelve más dúctil y manejable, y se transforma en vinilo (que no debe confundirse con el grupo vinilo). El PVC se usa para fabricar carpetas, tuberías, losas y tubo transparente Tygon[MR].

En el politetrafluoroetileno (PTFE o teflón), los cuatro átomos de hidrógeno de la estructura del polietileno son reemplazados por flúor. De nuevo, el monómero es simétrico y su resistencia no es mucho mayor que la del polietileno. Sin embargo, los enlaces C-F permiten que el PTFE tenga un alto punto de fusión, con la ventaja adicional de una baja fricción y de características antiadherentes que lo hacen útil para cojinetes y utensilios de cocina. El teflón fue inventado casualmente por Roy Plunkett, quien trabajaba con gas de tetrafluoroetileno. Se encontró con un cilindro de este gas que

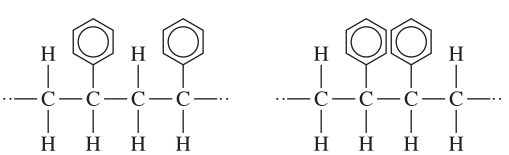


Figura 16-7 Configuración cabeza a cola contra cabeza a cabeza de unidades de repetición. La configuración más común es cabeza a cola.

no tenía presión, por lo que parecía estar vacío, pero pesaba más de lo normal. En su interior el gas se había polimerizado en teflón sólido.

La *ramificación* impide que las cadenas estén estrechamente empaquetadas, lo que reduce la densidad, rigidez y resistencia del polímero. El polietileno de baja densidad (LPDE), que tiene muchas ramificaciones, es más débil que el polietileno de alta densidad (HDPE), que prácticamente no tiene ramificaciones (tabla 16-2).

Cristalización y deformación

La *cristalinidad* es importante en los polímeros, ya que afecta sus propiedades mecánicas y ópticas. La cristalinidad se presenta durante el procesamiento de los polímeros como resultado de cambios en la temperatura y de esfuerzos aplicados (por ejemplo, la formación de botellas de PET, analizada en capítulos anteriores). Si las regiones cristalinas se vuelven demasiado grandes, comienzan a dispersar la luz y hacen translúcido al plástico. En ciertos polímeros especiales, regiones localizadas se cristalizan en respuesta a un campo eléctrico aplicado; este es el principio del funcionamiento de las pantallas de cristal líquido. Esto se estudiará de manera detallada en la siguiente sección. La cristalización del polímero también ayuda a incrementar su densidad, resistencia al ataque químico y propiedades mecánicas, e incluso a temperaturas más altas, debido a la fuerte unión existente entre las cadenas. Además, la deformación que endereza y alinea las cadenas y que lleva a la cristalización también produce una orientación preferente. Con frecuencia se utiliza la deformación de un polímero con objeto de producir fibras con propiedades mecánicas en la dirección de la fibra que excedan las de muchos metales y materiales cerámicos. Este reforzamiento por textura desempeñó una función clave en el descubrimiento de las fibras de nylon. En capítulos anteriores se ha visto cómo las botellas de PET desarrollan una textura y resistencia biaxial en la dirección radial y longitudinal.

Tacticidad

Cuando se forma un polímero a partir de unidades de repetición no simétricas, su estructura y propiedades quedan determinadas por la localización de los átomos o grupos de átomos no simétricos. Esta condición se conoce como **tacticidad**, es decir, estereoisomerismo. En la configuración sindiotáctica, los átomos o grupos de átomos ocupan posiciones alternativamente en los lados opuestos de la cadena lineal. En los polímeros *isotácticos*, todos los átomos están en

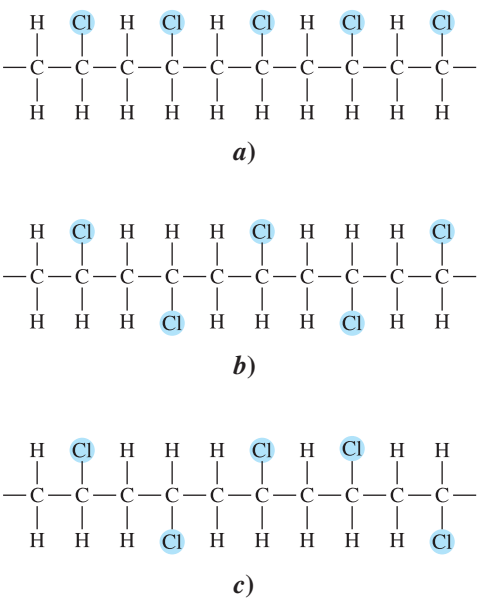


Figura 16-8 Tres configuraciones posibles de monómeros no simétricos: *a*) isotácticos, *b*) sindiotácticos y *c*) atácticos.

el mismo lado de la cadena, en tanto que en los polímeros *atácticos* la configuración de átomos es aleatoria (figura 16-8).

La estructura atáctica, que es la menos regular y predecible, tiende a generar un empaquetamiento deficiente, densidad baja, resistencia y tenacidad bajas, así como escasa resistencia al calor o al ataque químico. Los polímeros atácticos tienen mayores posibilidades de presentar una estructura amorfa. Un buen ejemplo de la importancia de la tacticidad lo representa el polipropileno. El polipropileno atáctico es un polímero amorfo parecido a la cera, de malas propiedades mecánicas, en tanto que el polipropileno isotáctico puede cristalizarse y es uno de los polímeros comerciales que más se usan.

Copolímeros

De manera similar al concepto de las soluciones sólidas o a la idea de los materiales compuestos, las cadenas lineales por adición compuestas de dos o más tipos de moléculas pueden organizarse para formar **copolímeros**. Esta es una forma muy poderosa de combinar las propiedades de diferentes polímeros. El arreglo de los monómeros dentro del copolímero puede asumir varias formas (figura 16-9), entre las que se incluyen los copolímeros alternados, aleatorios, en bloques o injertados. El ABS, compuesto por acrilonitrilo, butadieno (un elastómero sintético) y estireno, es uno de los materiales poliméricos más comunes (figura 16-10). Contiene dos copolímeros: el estireno y el acrilonitrilo, que forman un copolímero lineal (SAN) que sirve como matriz. El estireno y el butadieno también forman un copolímero lineal, el caucho BS, que actúa como material de relleno. La combinación de los dos copolímeros proporciona al ABS una excelente mezcla de rigidez, resistencia y tenacidad. Un copolímero común contiene unidades de repetición de etileno y propileno. Aun cuando el polietileno y el polipropileno son fácilmente cristalizables, el copolímero se conserva amorfo. Cuando este polímero se entrelaza, se comporta como un elastómero. El Dylark^{MR} es un copolímero de anhídrido maleico y estireno. El estireno aporta, en tanto que el anhídrido maleico añade propiedades a altas temperaturas. Al copolímero Dylark^{MR} se le agrega negro de carbono (para protegerlo de los rayos ultravioleta y mejorar la rigidez), caucho (para obtener tenacidad)

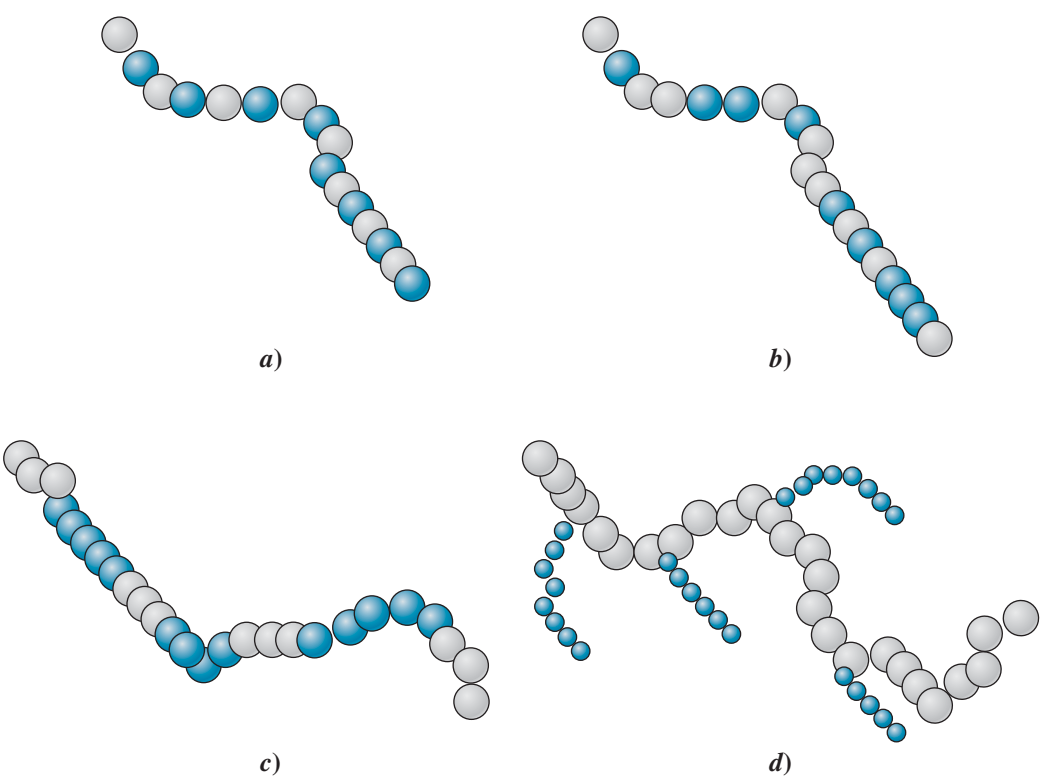


Figura 16-9 Cuatro tipos de copolímeros: *a*) monómeros alternos, *b*) monómeros aleatorios, *c*) copolímeros en bloque y *d*) copolímeros injertados. Los diversos monómeros se representan con círculos de tamaños o colores diferentes.

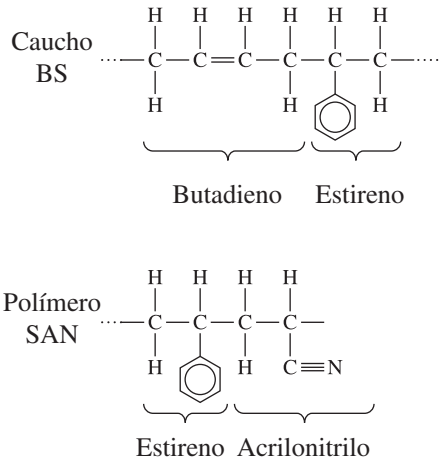


Figura 16-10 La copolimerización produce el polímero ABS, que en realidad está formado por dos copolímeros, SAN y BS, injertados uno en el otro.

y fibras de vidrio (para mayor rigidez). Se usa en tableros de instrumentos en automóviles. Después el plástico Dylark^{MR} se recubre con vinilo, con lo que se obtiene un terminado liso y blando.

Mezclas y aleaciones

Se pueden mejorar las propiedades mecánicas de muchos de los termoplásticos por medio de la mezcla y la aleación. Al mezclar un elastómero no miscible con el termoplástico se produce un polímero de dos fases, como se vio en el ABS. El elastómero no se introduce en la estructura como copolímero, sino que ayuda a absorber energía y mejorar la tenacidad. Los policarbonatos que se utilizan para producir cubiertas corredizas transparentes para aeronaves también se endurecen con elastómeros con este procedimiento.

Polímeros cristalinos líquidos

Algunas de las cadenas termoplásticas complejas se hacen tan rígidas que se comportan como barras rígidas, incluso a altas temperaturas. Estos materiales son los **polímeros cristalinos líquidos** (LCP). Algunos poliésteres aromáticos y poliamidas aromáticas (o **aramidas**) son ejemplos de polímeros cristalinos líquidos y se usan como fibras de alta resistencia (como se verá en el capítulo 17). El Kevlar^{MR}, una poliamida aromática, es el LCP más conocido y se usa como fibra de refuerzo para aplicaciones aeroespaciales y para chalecos a prueba de balas. Los polímeros de cristal líquido (LC) se usan también en la fabricación de pantallas electrónicas.

16-6 Efecto de la temperatura en termoplásticos

Las propiedades de los termoplásticos cambian en función de la temperatura. Conocer la manera como ocurren estos cambios puede ayudar *a*) a diseñar mejores componentes, y *b*) a guiar el tipo de técnicas de procesamiento que deban aplicarse. Se pueden observar varias temperaturas y estructuras críticas, las cuales se resumen en las figuras 16-11 y 16-12.

Una vez que se han enfriado por debajo de la temperatura de fusión, los termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos (figura 16-11). Los termoplásticos ingenieriles están formados muy frecuentemente por regiones amorfas y cristalinas. La cristalinidad en los materiales termoplásticos puede lograrse mediante temperatura (enfriamiento lento) o por la aplicación de esfuerzos que desenmarañan cadenas (**cristalización inducida por esfuerzo**). De manera similar al endurecimiento por dispersión de los materiales metálicos, la formación de regiones cristalinas en una matriz amorfa ayuda a incrementar la resistencia de los termoplásticos. En los materiales termoplásticos comunes,

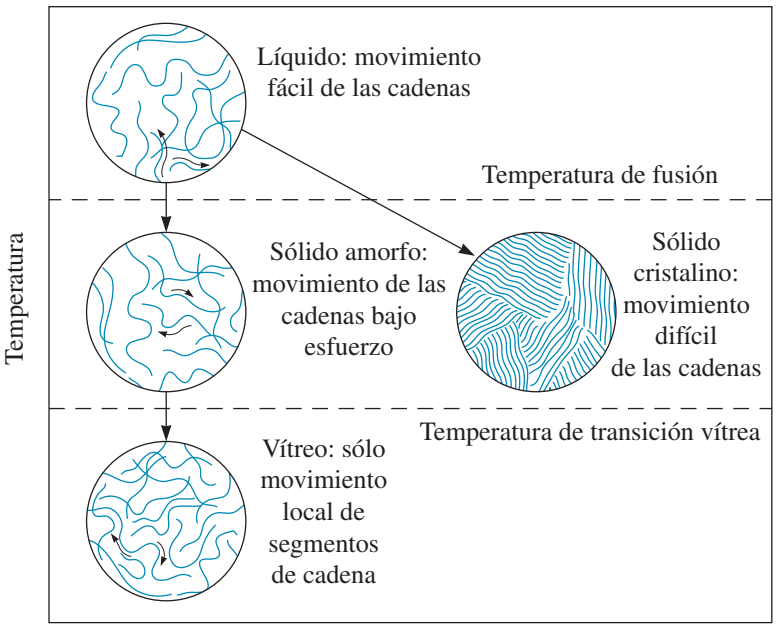


Figura 16-11 Efecto de la temperatura en la estructura y el comportamiento de los materiales termoplásticos.

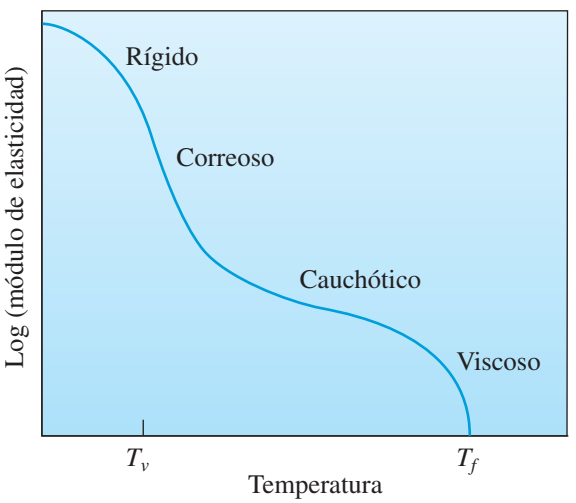


Figura 16-12 Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad en un polímero termoplástico amorfo. Observe que T_v y T_f no son fijas.

las uniones dentro de las cadenas son covalentes, pero las largas cadenas en espiral están "unidas" entre sí por débiles enlaces de van der Waals y enmarañamiento. Cuando se le aplica un esfuerzo de tensión al termoplástico, puede superarse la débil unión entre las cadenas, lo que permite que éstas giren y se deslicen una en relación con la otra. La facilidad con que dichas cadenas pueden deslizarse depende a su vez de la temperatura y la estructura del polímero.

Temperatura de degradación

Los enlaces covalentes entre los átomos dentro de la cadena lineal pueden destruirse a temperaturas muy altas, y el polímero puede quemarse o carbonizarse. La descomposición en los polímeros termoplásticos se presenta en estado líquido, y en los termoestables en estado sólido. Esta temperatura T_d (que no aparece en la figura 16-12) es la **temperatura de degradación** o de descomposición. Cuando los plásticos se queman generan humo, lo cual es peligroso. Algunos materiales agregados a los termoplásticos (por ejemplo, piedra caliza, talco, alúmina, etc.) actúan como estabilizadores térmicos, es decir, del calor. Absorben el calor, con lo que protegen la matriz polimérica. A fin de retardar la ignición de los polímeros, se agregan aditivos retardadores del fuego (por ejemplo, alúmina hidratada, o materiales compuestos de antimonio

o de halógenos, como MgBr o PCl_5). Algunos aditivos retardan el fuego al excluir el oxígeno, pero generan gases dañinos y no son apropiados para ciertas aplicaciones.

La exposición a otras formas de productos químicos o energías (por ejemplo, oxígeno, radiación ultravioleta y ataques por bacterias) provoca que el polímero se degrade o **envejezca** lentamente, incluso a bajas temperaturas. El negro de carbono (hasta ~3%) es uno de los aditivos comúnmente empleados que ayudan a mejorar la resistencia de los plásticos contra la degradación por rayos ultravioleta.

Polímeros líquidos

Los materiales termoplásticos por lo general no se funden a una temperatura precisa. Al respecto, existe un margen de temperaturas en que ocurre la fusión. Los márgenes de fusión aproximados de los polímeros comunes figuran en la tabla 16-5. A la temperatura de fusión T_f o por encima de ésta, la unión entre las cadenas en espiral y entrelazadas es débil. Si se aplica una fuerza, las cadenas se deslizan una sobre otra y el polímero fluye prácticamente sin ninguna deformación elástica. La resistencia y el módulo de elasticidad son casi cero, y el polímero está listo para fundirse y para muchos procesos de formado. La mayoría de los termoplásticos fundidos se adelgazan por cortante, es decir, su viscosidad aparente se reduce al incrementarse la velocidad cortante en estado estacionario.

Estados cauchóticos y correosos

Por debajo de la temperatura de fusión, las cadenas de polímero continúan retorcidas y entrelazadas. Estos polímeros tienen una estructura amorfa. Justo por debajo de la temperatura de fusión, el polímero se comporta como un *caucho*. Cuando se le aplica un esfuerzo ocurre una deformación elástica y una plástica; cuando se elimina el esfuerzo la deformación elástica se recupera con rapidez, pero el polímero queda deformado de

Tabla 16-5 Intervalos de temperatura de fusión, de transición vítrea y de procesamiento (°C) para polímeros termoplásticos y elastómeros seleccionados

Polímero	Intervalo de temperatura de fusión	Intervalo de temperatura de transición vítrea (T_v)	Intervalo de temperatura de procesamiento
Polímeros por adición			
Polietileno de baja densidad (LD)	98–115	−90 a −25	149–232
Polietileno de alta densidad (HD)	130–137	−110	177–260
Cloruro de polivinilo	175–212	87	
Polipropileno	160–180	−25 a −20	190–288
Poliestireno	240	85–125	
Poliacrilonitrilo	320	107	
Politetrafluoroetileno (teflón)	327		
Policrorotrifluoroetileno	220		
Polimetilmetacrilato (acrílico)		90–105	
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	110–125	100	177–260
Polímeros por condensación			
Acetal	181	−85	
6,6-nylon	243–260	49	260–327
Acetato de celulosa	230		
Policarbonato	230	149	271–300
Poliéster	255	75	
Polietileno tereftalato (PET)	212–265	66–80	227–349
Elastómeros			
Silicona		−123	
Polibutadieno	120	−90	
Policloropreno	80	−50	
Poliisopreno	30	−73	

manera permanente debido al movimiento de las cadenas. Se pueden lograr grandes alargamientos permanentes, lo que permite que el polímero adquiera formas útiles mediante el moldeo y la extrusión.

A temperaturas inferiores, el enlace entre cadenas es más fuerte, el polímero se vuelve más rígido y resistente y se observa un comportamiento *correoso*. Muchos de los polímeros comerciales (incluso el polietileno) tienen en este estado una resistencia que puede ser útil.

Estado vítreo

Por debajo de la **temperatura de transición vítrea** T_v, el polímero amorfo lineal se hace duro, frágil y como el vidrio. De nuevo, no se trata de una temperatura fija sino de un intervalo o rango de temperaturas. Cuando el polímero se enfría por debajo de la temperatura de transición vítrea, ciertas propiedades, como la densidad o el módulo de elasticidad, cambian con diferente rapidez (figura 16-13). Cuando se alcanza la temperatura de transición vítrea se presenta un cambio en la pendiente de la densidad como función de la temperatura. También se observa un cambio en la pendiente en los polímeros semicristalinos cuando la porción amorfa se transforma en líquido o viceversa.

A pesar de que los polímeros vítreos tienen mala ductilidad y formabilidad, poseen buena tenacidad, rigidez y resistencia a la termofluencia. Varios polímeros importantes (entre los que se incluyen el poliestireno y el cloruro de polivinilo) tienen temperaturas de transición vítrea por encima de la temperatura ambiente (tabla 16-5).

La temperatura de transición vítrea comúnmente es de 0.5 a 0.75 veces la temperatura de fusión absoluta T_f. Los polímeros como el polietileno, que no tienen grupos laterales complicados fijos a la cadena principal de carbono, presentan temperaturas bajas de transición vítrea, incluso por debajo de la temperatura ambiente, en comparación con polímeros como el poliestireno, que tienen grupos laterales mucho más complejos.

Como se indicó en el capítulo 6, muchos materiales termoplásticos se vuelven frágiles a temperaturas más bajas. La fragilidad del polímero utilizado en algunos de los sellos "O" causó el desastre del *Challenger* en 1986. Las temperaturas tan bajas prevalecientes en el momento del lanzamiento provocaron la fragilidad de los sellos "O" usados en los motores cohete suplementarios.

Observación y medición de la cristalinidad en polímeros

Numerosos polímeros termoplásticos se cristalizan parcialmente al ser enfriados por debajo de su temperatura de fusión, y las cadenas se acercan y alinean estrechamente a lo largo de distancias considerables. Conforme las cadenas en espiral y entrelazadas se reorganizan dentro del líquido y forman una estructura más ordenada y compacta, se presenta un brusco incremento de la densidad (figura 16-13).

En la figura 16-14 se muestra un modelo que describe el arreglo de las cadenas en un polímero cristalino. En este modelo de *cadenas plegadas*, éstas se doblan sobre sí mismas, y cada doblez tiene una longitud de aproximadamente 100 átomos de carbono. La cadena plegada se extiende en

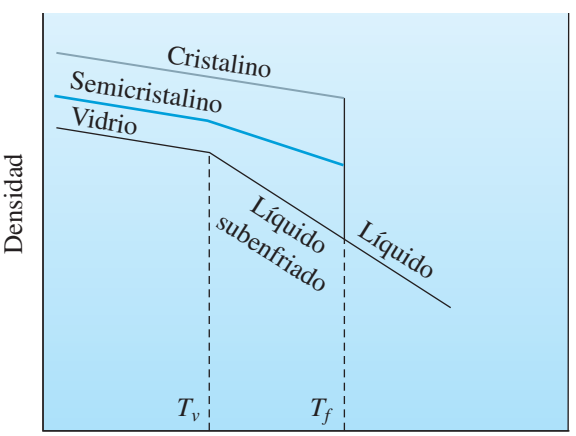


Figura 16-13 La relación entre la densidad y la temperatura de un polímero muestra las temperaturas de fusión y transición vítrea. Note que T_v y T_f no son fijas sino intervalos de temperaturas.

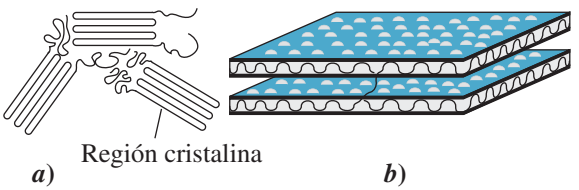


Figura 16-14 Modelo de cadenas plegadas para la cristalinidad en los polímeros, que se muestran en *a*) dos dimensiones y *b*) tres dimensiones.

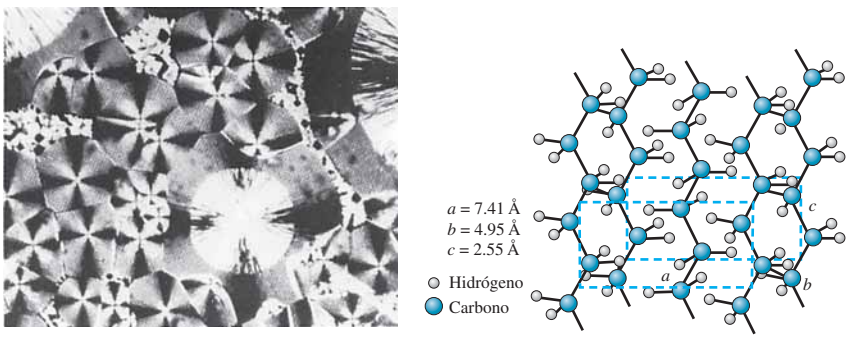


Figura 16-15 *a*) Cristales esferulíticos en una matriz amorfa de nylon (200 ×). (*Fuente: R. M. Brick* et al. Structure and Properties of Engineering Materials. *Derechos reservados, 1977.*) *b*) Celda unitaria de polietileno cristalino.

las tres dimensiones produciendo placas delgadas, es decir, laminillas. Los cristales pueden adoptar varias formas, de las que es particularmente común la forma esferulítica que se muestra en la figura 16-15*a*). Los cristales tienen una celda unitaria que describe el empaquetamiento normal de las cadenas. La estructura cristalina para el polietileno, que se ilustra en la figura 16-15*b*), describe una de estas celdas. En la tabla 16-6 se detallan las estructuras cristalinas para varios polímeros. Algunos de éstos son polimórficos, es decir, tienen más de una estructura cristalina.

Incluso en los polímeros cristalinos existen siempre regiones angostas entre las laminillas, así como entre las esferulitas, que son regiones de transición amorfa. El porcentaje en peso de la estructura que es cristalina puede calcularse a partir de la densidad del polímero:

$$\% \text{ Cristalina} = \frac{\rho_c(\rho - \rho_a)}{\rho(\rho_c - \rho_a)} \times 100 \tag{16-4}$$

donde ρ es la densidad medida del polímero, ρ_a la densidad del polímero amorfo y ρ_c la densidad del polímero completamente cristalino. De igual manera, puede utilizarse la difracción de rayos X (DRX) a fin de medir el nivel de cristalinidad y la determinación de las constantes de la estructura cristalina para polímeros monocristalinos.

Tabla 16-6 Estructuras cristalinas de varios polímeros

Polímero	Estructura cristalina	Parámetros de red (nm)
Polietileno	Ortorrómbica	$a_0 = 0.741$ $b_0 = 0.495$ $c_0 = 0.255$
Polipropileno	Ortorrómbica	$a_0 = 1.450$ $b_0 = 0.569$ $c_0 = 0.740$
Cloruro de polivinilo	Ortorrómbica	$a_0 = 1.040$ $b_0 = 0.530$ $c_0 = 0.510$
Poliisopreno (cis)	Ortorrómbica	$a_0 = 1.246$ $b_0 = 0.886$ $c_0 = 0.810$

Conforme los grupos laterales se vuelven más complejos, resulta más difícil cristalizar los termoplásticos. Por ejemplo, el polietileno (grupo lateral H) puede cristalizarse con mayor facilidad que el polietileno (grupo lateral anillo de benceno). El polietileno de alta densidad (HDPE) tiene un nivel superior de cristalinidad y, por lo tanto, una densidad más alta (0.97 g/cm^3) que el polietileno de baja densidad (LDPE), cuya densidad es de 0.92 g/cm^3. La cristalinidad y, en consecuencia, la densidad del LDPE es inferior en vista de que este polímero es ramificado. Por lo tanto, los polímeros ramificados exhiben niveles menores de cristalinidad. Un polímero totalmente cristalino no tendría una temperatura de transición vítrea; sin embargo, las regiones amorfas en los polímeros semicristalinos sí se convierten en un material vítreo por debajo de la temperatura de transición vítrea (figura 16-13). Los polímeros como el acetal, el nylon, el HDPE y el polipropileno se conocen como cristalinos, aun cuando su nivel de cristalinidad pudiera ser moderado. Los siguientes ejemplos muestran cómo las propiedades de los plásticos pueden reconocerse en diferentes aplicaciones.

Ejemplo 16-6 *Diseño de un material polimérico aislante*

Un depósito para el almacenamiento de hidrógeno líquido se fabricará de metal, pero se desea revestir dicho metal con una capa intermedia de polímero de 3 mm de espesor entre el metal y las capas de aislamiento adicionales. La temperatura de la capa intermedia puede bajar hasta –80ºC. Diseñe un material para esta capa.

SOLUCIÓN

Se pretende que el material tenga una ductilidad razonable. Conforme cambia la temperatura en el depósito, se presentan esfuerzos en el revestimiento a causa de las diferencias en la dilatación térmica, y no se desea que falle el polímero por esta razón. Se necesita un material que tenga buena ductilidad y/o que pueda soportar grandes deformaciones elásticas. Por lo tanto, se prefiere un material termoplástico con una temperatura de transición vítrea inferior a −80ºC, o un elastómero con una temperatura de transición vítrea también por debajo de los −80ºC. De los polímeros de la tabla 16-5, se llega a la conclusión de que los termoplásticos como el acetal y el polietileno son satisfactorios. Entre los elastómeros apropiados pueden incluirse la silicona y el polibutadieno.

Se podría elegir quizá uno de los elastómeros, ya que éstos pueden "absorber" esfuerzos térmicos mediante deformación elástica en vez de plástica.

Ejemplo 16-7 *Polietileno resistente al impacto*

Un nuevo tipo de polietileno flexible y resistente al impacto, para usarse como una película delgada, debe tener una densidad de 0.88 a 0.915 g/cm^3. Diseñe el polietileno necesario para estas propiedades. La densidad del polietileno amorfo es de aproximadamente 0.87 g/cm^3.

SOLUCIÓN

Para generar las propiedades y densidades deseadas, se debe controlar el porcentaje de cristalinidad del polietileno. Se puede utilizar la ecuación 16-4 para determinar la cristalinidad que corresponde al intervalo requerido de densidad; sin embargo, para ello se debe conocer la densidad del polietileno totalmente cristalino. Se pueden utilizar los datos de la figura 16-15 y la tabla 16-6 para calcular la densidad, si se acepta que existen dos unidades de repetición de polietileno en cada celda unitaria.

$$\rho_c = \frac{(4 \text{ átomos de C})(12 \text{ g/mol}) + (8 \text{ átomos de H})(1 \text{ g/mol})}{(7.41 \times 10^{-8} \text{ cm})(4.95 \times 10^{-8} \text{ cm})(2.55 \times 10^{-8} \text{ cm})(6.022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})}$$
$$= 0.9942 \text{ g/cm}^3$$

Se sabe que $\rho_a = 0.87$ g/cm^3 y que ρ varía de 0.88 a 0.915 g/cm^3. La cristalinidad necesaria varía entonces desde

$$\%\ \text{cristalino} = \frac{(0.9942)(0.88 - 0.87)}{(0.88)(0.9942 - 0.87)} \times 100 = 9.1$$

$$\%\ \text{cristalino} = \frac{(0.9942)(0.915 - 0.87)}{(0.915)(0.9942 - 0.87)} \times 100 = 39.4$$

Por lo tanto, se debe procesar el polietileno para producir un intervalo de cristalinidad de 9.1 a 39.4%.

16-7 Propiedades mecánicas de los termoplásticos

La mayoría de los polímeros termoplásticos (fundidos y sólidos) muestran un **comportamiento viscoelástico** y no newtoniano. El comportamiento es no newtoniano (es decir, el esfuerzo y la deformación no están relacionados linealmente para la mayor parte de la curva esfuerzo-deformación). Se considera que se presenta comportamiento viscoelástico cuando se aplica una fuerza externa a un polímero termoplástico y ocurren deformaciones tanto elásticas como plásticas (viscosas). El comportamiento mecánico está íntimamente ligado a la manera como se mueven las cadenas poliméricas bajo carga en relación con las demás. El proceso de deformación depende a la vez del tiempo y de la rapidez con que se aplica la carga. La figura 16-16 muestra una curva esfuerzo-deformación para el nylon 6,6.

Comportamiento elástico

La deformación elástica en estos polímeros termoplásticos es resultado de dos mecanismos. Un esfuerzo aplicado hace que los enlaces covalentes de las cadenas se estiren y distorsionen, lo que permite el alargamiento elástico de éstas. Cuando se elimina el esfuerzo, la recuperación de esta distorsión ocurre casi de forma instantánea. Este comportamiento es similar al de los metales y los materiales cerámicos, que también se deforman elásticamente al estirar los enlaces metálicos, iónicos o covalentes. Pero además se pueden distorsionar segmentos completos; cuando se elimina el esfuerzo, los segmentos vuelven a sus posiciones originales sólo después de cierto tiempo, que puede ser de horas hasta meses. Este comportamiento dependiente del tiempo, o viscoelástico, puede contribuir a algún comportamiento elástico no lineal.

Comportamiento plástico de los termoplásticos amorfos

Estos polímeros se deforman plásticamente cuando el esfuerzo es mayor que la resistencia a la fluencia. Sin embargo, a diferencia de la deformación en el caso de los metales, la deformación plástica no es una consecuencia del movimiento de dislocaciones. Por el contario, las cadenas se estiran, giran, se deslizan y se desenmarañan bajo la acción de la carga hasta provocar una deformación permanente. Este fenómeno puede explicar la caída en el esfuerzo más allá del punto de fluencia. Inicialmente,

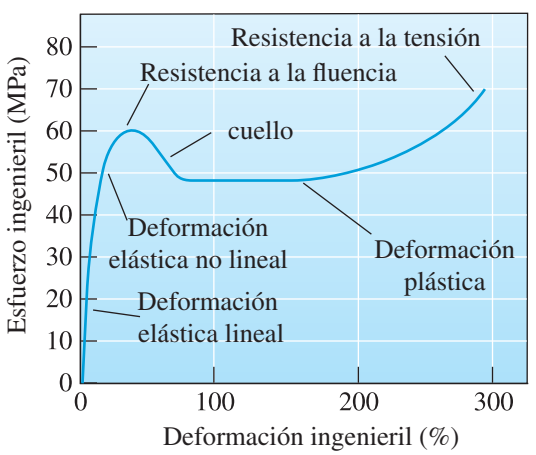


Figura 16-16 Curva ingenieril de esfuerzo-deformación para el nylon 6,6, un polímero termoplástico común.

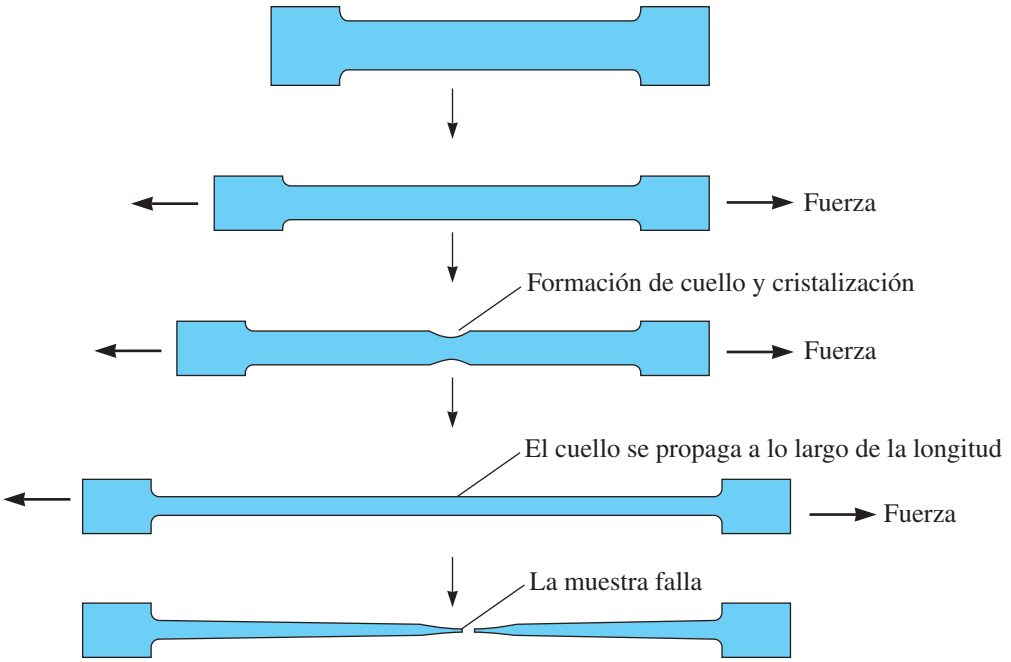


Figura 16-17 La formación de cuello puede ser estable en los polímeros amorfos, debido a que la alineación local endurece la región de sección reducida.

las cadenas pueden estar muy enmarañadas y entrelazadas. Cuando el esfuerzo es considerable, las cadenas comienzan a desenmarañarse y enderezarse. También tiene lugar el cuello, lo que permite el continuo deslizamiento de las cadenas con un esfuerzo menor. Sin embargo, las cadenas finalmente se ordenan de una forma casi paralela y muy cerca unas de otras; el enlace de van der Waals, más fuerte entre las cadenas alineadas más estrechamente, requiere de esfuerzos superiores para completar el proceso de deformación y fractura (figura 16-17).

Ejemplo 16-8 *Comparación de las propiedades mecánicas de los termoplásticos*

Compare las propiedades mecánicas del polietileno de baja densidad (LD), del polietileno de alta densidad (HD), del cloruro de polivinilo, del polipropileno y del poliestireno, y explique las diferencias en función de sus estructuras.

SOLUCIÓN

En seguida se muestran la resistencia máxima a la tensión y el módulo de elasticidad de cada uno de los polímeros.

Polímero	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Estructura
Polietileno LD	21	276	Estructura amorfa muy ramificada con monómeros simétricos
Polietileno HD	38	1241	Estructura amorfa con monómeros simétricos pero con pocas ramificaciones
Polipropileno	41	1517	Estructura amorfa con pequeños grupos laterales de metilo
Poliestireno	55	3103	Estructura amorfa con grupos laterales de benceno
Cloruro de polivinilo	62	4137	Estructura amorfa con grandes átomos de cloro como grupos laterales

Se puede concluir lo siguiente:

1. Las ramificaciones, que disminuyen la densidad y el empaquetamiento estrecho de las cadenas, reducen las propiedades mecánicas del polietileno.
2. Al añadir átomos o grupos de átomos distintos del hidrógeno a la cadena, se incrementan la resistencia y la rigidez. El grupo metilo en el polipropileno provoca cierta mejora, el anillo de benceno del estireno proporciona mejores propiedades y el átomo de cloro en el cloruro de polivinilo aporta un incremento importante a las propiedades.

Fluencia lenta y relajación de esfuerzo

Los polímeros termoplásticos también exhiben termofluencia (fluencia lenta), una deformación permanente que depende del tiempo ante un esfuerzo o carga constante (figuras 16-18 y 16-19).

También muestran **relajación de esfuerzo**, es decir, bajo una deformación constante el nivel de esfuerzo se reduce con el tiempo (capítulo 6). La relajación de esfuerzo, al igual que la fluencia lenta, es consecuencia del comportamiento viscoelástico del polímero. Quizás el ejemplo más familiar de este comportamiento es una banda elástica (un elastómero) estirada alrededor de varios libros. Inicialmente, la tensión en la banda elástica es alta cuando está tensa. Después de varias semanas, la deformación en la banda elástica no ha cambiado: sigue estando alrededor de los libros, pero el esfuerzo ha disminuido. De igual manera, las cuerdas de nylon en raquetas de tenis se estiran inicialmente con una tensión alta, ya que el esfuerzo disminuye con el transcurso del tiempo.

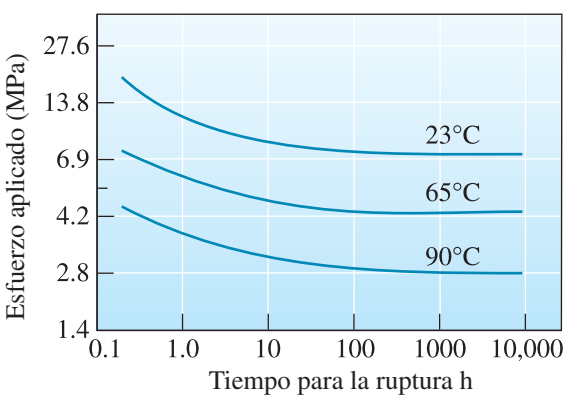


Figura 16-18 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento esfuerzo-ruptura del polietileno de alta densidad.

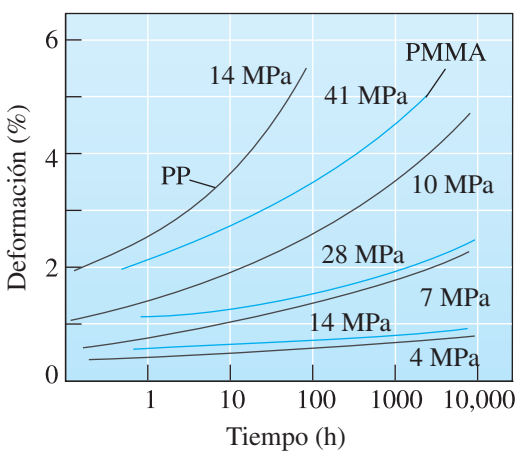


Figura 16-19 Curvas de fluencia lenta para el acrílico (PMMA) y el polipropileno (PP) a 20°C, y varios esfuerzos aplicados.

En un modelo simple, la rapidez con la que ocurre la relajación de esfuerzo se relaciona con el **tiempo de relajación** λ, que se considera una propiedad del polímero (modelos más complejos utilizan una distribución de los tiempos de relajación). El esfuerzo después del tiempo t está dado por

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-t/\lambda) \tag{16-5}$$

donde σ_0 es el esfuerzo original. A su vez, el *tiempo de relajación* depende de la viscosidad y, por lo tanto, de la temperatura:

$$\lambda = \lambda_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{16-6}$$

donde λ_0 es una constante y Q es la energía de activación que se relaciona con la facilidad con que las cadenas poliméricas se deslizan entre sí. La relajación del esfuerzo ocurre con *mayor rapidez a temperaturas más altas* y para aquellos polímeros de baja viscosidad.

El siguiente ejemplo muestra cómo se puede considerar la relajación del esfuerzo durante el diseño de polímeros.

Ejemplo 16-9 *Determinación del esfuerzo inicial en un polímero*

Una banda de poliisopreno debe mantener unido un paquete de varillas de acero durante un año. Si el esfuerzo en la banda es menor de 10 MPa, ésta no sujetará firmemente a las varillas. Diseñe el esfuerzo inicial que debe aplicarse a una banda de poliisopreno cuando es colocada sobre el acero. Una serie de pruebas mostró que un esfuerzo inicial de 7 MPa se redujo a 6.8 MPa después de seis semanas.

SOLUCIÓN

Aun cuando la deformación en la banda del elastómero puede ser constante, el esfuerzo disminuirá con el transcurso del tiempo debido a la relajación del esfuerzo. Se puede aplicar la ecuación (16-5) y las pruebas iniciales para determinar el tiempo de relajación para el polímero.

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)$$

$$6.8 \text{ MPa} = 7 \text{ MPa} \exp\left(-\frac{6 \text{ semanas}}{\lambda}\right)$$

$$-\frac{6}{\lambda} = \ln\left(\frac{6.8}{7}\right) = \ln(0.98) = -0.0202$$

$$\lambda = \frac{6}{0.0202} = 297 \text{ semanas}$$

Ahora que se sabe cuál es el tiempo de relajación, puede determinarse el esfuerzo que debe aplicarse inicialmente a la banda a fin de que quede bajo un esfuerzo de 10 MPa después de un año (52 semanas).

$$10 = \sigma_0 \exp(-52/297) = \sigma_0 \exp(-0.1751) = 0.8394\,\sigma_0$$

$$\sigma_0 = \frac{1500}{0.8394} = 11.91 \text{ MPa}$$

La banda de poliisopreno debe fabricarse significativamente subdimensionada, de manera que pueda deslizarse sobre los materiales que se unirán con una tensión de 11.91 MPa. Después de un año el esfuerzo seguirá siendo de 10 MPa.

Una medida más práctica de las propiedades de alta temperatura y de fluencia lenta de un polímero es la **temperatura de deflexión** o **temperatura de distorsión** térmica bajo carga, que es la temperatura a la que ocurre una deformación dada en una viga para una carga estándar. Una temperatura alta de deflexión indica buena resistencia a la fluencia lenta (termofluencia) y permite comparar varios polímeros. En la tabla 16-7 se muestran las temperaturas de deflexión para varios

Tabla 16-7 Temperaturas de deflexión para polímeros seleccionados bajo una carga de 1.8 MPa

Polímero	Temperatura de deflexión (°C)
Poliéster	40
Polietileno (densidad ultra alta)	40
Polipropileno	60
Fenólica	80
Poliamida (nylon 6,6)	90
Poliestireno	100
Polioximetileno (acetal)	130
Poliamidaimida	280
Epoxi	290

polímeros, que proporcionan la temperatura requerida para provocar una deflexión de 0.025 cm bajo una carga de 1.8 MPa en el centro de una barra que descansa sobre puntos de apoyo que tienen una separación de 10 cm. Un polímero es "a prueba de lavavajillas" si tiene una temperatura de distorsión térmica superior a ~ 50°C.

Comportamiento al impacto

El comportamiento viscoelástico también ayuda a comprender las propiedades al impacto de los polímeros. A velocidades de deformación muy altas, como ocurre en una prueba de impacto, no hay tiempo suficiente para que las cadenas se deslicen y provocan deformación plástica. En estas circunstancias, los termoplásticos se comportan de manera frágil y tienen bajos valores al impacto. Los polímeros pueden tener una temperatura de transición. A bajas temperaturas se observa un comportamiento frágil en una prueba de impacto, mientras que a temperaturas altas se muestra un comportamiento más dúctil, cuando las cadenas se mueven con mayor facilidad. Estos efectos sobre la temperatura y la rapidez de deformación son similares a los que se observan en los metales, que exhiben una temperatura de transición de dúctil a frágil; no obstante, los mecanismos son distintos.

Deformación de polímeros cristalinos

Varios polímeros se usan en estado cristalino. Sin embargo, como ya se comentó, estos materiales nunca son totalmente cristalinos. Existen pequeñas regiones (que son regiones de transición amorfas) entre las laminillas cristalinas y las esferulitas cristalinas. Las cadenas poliméricas en la región cristalina se extienden hacia el interior de esas regiones amorfas como cadenas de unión. Cuando se le aplica una carga de tensión al polímero, las laminillas cristalinas dentro de las esferulitas se deslizan una encima de otra y comienzan a separarse conforme las cadenas de unión se estiran. Los dobleces entre laminillas se tuercen y alinean en dirección a la carga de tensión. Las laminillas cristalinas se rompen en trozos más pequeños y se deslizan, hasta que el polímero queda fragmentado en pequeños cristales alineados y sujetos a cadenas de unión, orientados en forma paralela hacia la carga de tensión. Además, las esferulitas cambian de forma alargándose en la dirección del esfuerzo aplicado. Bajo un esfuerzo continuado, las cadenas de unión se desenmarañan o rompen, lo que provoca que el polímero falle.

Microcavidades

Las **microcavidades** ocurren cuando regiones localizadas de deformación plástica se presentan en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. En termoplásticos transparentes (por ejemplo, polímeros vítreos), las microcavidades producen una región translúcida u opaca con apariencia de grieta. La microcavidad puede crecer hasta extenderse por toda la sección transversal del polímero. La microcavidad no es una grieta, y, de hecho, puede continuar para soportar un esfuerzo aplicado. El proceso es semejante al de la deformación plástica del polímero, pero el proceso puede continuar incluso en un esfuerzo pequeño durante un tiempo prolongado. La microcavidad puede provocar una fractura frágil en el polímero y con frecuencia es asistida por la presencia de un solvente (conocido como microcavidad de solvente).

Coloreado

El **coloreado** o blanqueado se refiere a la falla de un plástico por una cristalización localizada, que se debe a varios dobleces, lo que finalmente genera la formación de huecos.

16-8 Elastómeros (cauchos)

Varios polímeros naturales y sintéticos conocidos como elastómeros presentan gran cantidad de deformación elástica (> 200%) cuando se les aplica una fuerza. Las bandas elásticas, los neumáticos de automóvil, O-rings las mangueras y el aislamiento de conductores eléctricos son ejemplos comunes de este tipo de materiales. Los elastómeros se conocen como cauchos porque el caucho en estado natural es un elastómero.

Isómeros geométricos

Algunos monómeros con estructuras diferentes, aunque con su misma composición, se llaman **isómeros geométricos**. Un ejemplo importante es el isopreno, es decir, el caucho natural (figura 16-20). El monómero incluye dos enlaces dobles entre átomos de carbono; este tipo de monómero se conoce como **dieno**. La polimerización ocurre cuando se rompen los dos enlaces dobles, lo que crea un nuevo enlace doble en el centro de la molécula y deja sitios activos en los extremos.

En la forma *trans* del isopreno, el átomo de hidrógeno y el grupo metilo en el centro de la unidad de repetición se encuentran en lados opuestos del doble enlace recién formado. Esta disposición lleva a cadenas relativamente rectas; el polímero se cristaliza y forma un polímero rígido y duro que se llama *gutapercha*. Éste se utiliza para fabricar pelotas de golf y suelas para calzado.

Sin embargo, en la forma *cis*, el átomo de hidrógeno y el grupo metilo se encuentran del mismo lado del enlace doble. Esta diversa geometría hace que las cadenas del polímero se desarrollen en una estructura muy enrollada, lo que dificulta una gran compactación y genera un polímero de caucho amorfo. Si al cis-isopreno se le aplica un esfuerzo, el polímero se comporta de manera viscoelástica. Las cadenas se desenrollan y los enlaces se estiran, lo cual produce una deformación elástica, aunque también las cadenas se deslizan entre sí y provocan una deformación plástica que no se recupera. El polímero se comporta como termoplástico y no como elastómero.

Enlaces cruzados

Mediante el **enlace cruzado** de las cadenas se puede evitar la deformación plástica viscosa y, al mismo tiempo, conservar una gran deformación elástica (figura 16-21). La **vulcanización**, proceso en el que se utilizan átomos de azufre, es un método común para formar enlaces cruzados. La figura 16-22 muestra la forma en que hileras de átomos de azufre pueden enlazar las cadenas poliméricas, conforme este último se procesa y conforma a temperaturas de aproximadamente 120 a 180°C. Los pasos de enlazamiento cruzado pueden incluir el reacomodo de un

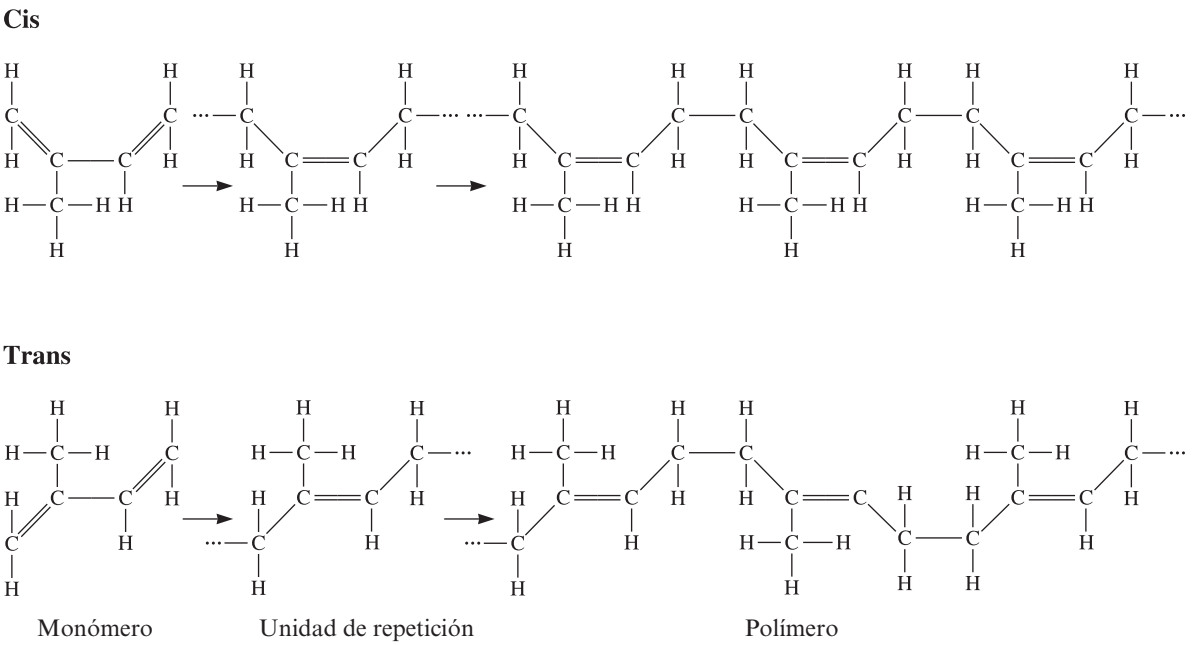


Figura 16-20 Estructuras cis y trans del isopreno. La forma cis es útil para la producción del elastómero isopreno.

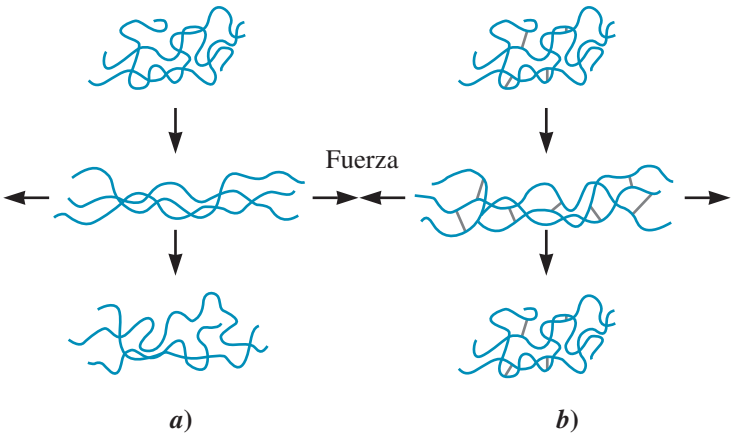


Figura 16-21 *a*) Cuando el elastómero no contiene enlaces cruzados, la aplicación de una fuerza provoca deformación elástica y plástica; una vez eliminada la carga, el elastómero queda deformado en forma permanente. *b*) Cuando existen enlaces cruzados, el elastómero quizá pueda sufrir una gran deformación elástica, pero al eliminarse la carga, éste vuelve a su forma original.

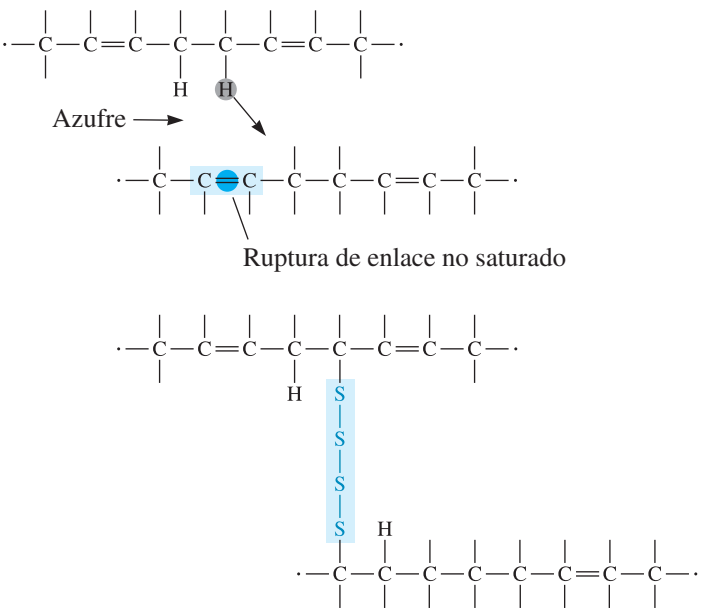


Figura 16-22 Enlaces cruzados de las cadenas de poliisopreno, que pueden presentarse al introducir hileras (cadenas cortas) de átomos de azufre. Los sitios de fijación del azufre se presentan al reacomodarse o perderse un átomo de hidrógeno y por la ruptura de un enlace no saturado.

átomo de hidrógeno y el reemplazo de uno o más de los enlaces dobles con sencillos. El proceso de enlazamiento cruzado no es reversible y, en consecuencia, este elastómero no es fácilmente reciclable.

La curva de esfuerzo-deformación para un elastómero se ilustra en la figura 16-23. Prácticamente toda la curva representa deformación elástica; por lo tanto, los elastómeros muestran un comportamiento elástico no lineal. Al principio, el módulo de elasticidad se reduce debido a que las cadenas se desenrollan. Sin embargo, una vez extendidas las cadenas, ocurre cualquier deformación elástica adicional debido al estiramiento de los enlaces, lo que genera un módulo de elasticidad más elevado.

El número de enlaces cruzados (o la cantidad de azufre que se ha agregado al material) determina la elasticidad del caucho. Las bajas adiciones de azufre dejan al caucho blando y flexible (por ejemplo, las bandas elásticas o los guantes de caucho). Al incrementar el contenido de azufre, se restringe el desenrollado de las cadenas y el caucho se hace más duro, rígido y frágil, como en el caucho que se usa en los soportes de motores. Por lo general, se agrega de 0.5 a 5% de azufre para obtener el enlace cruzado en los elastómeros. En años recientes se han desarrollado y utilizado también muchos más sistemas de *vulcanización eficiente* (VE) que no tienen azufre.

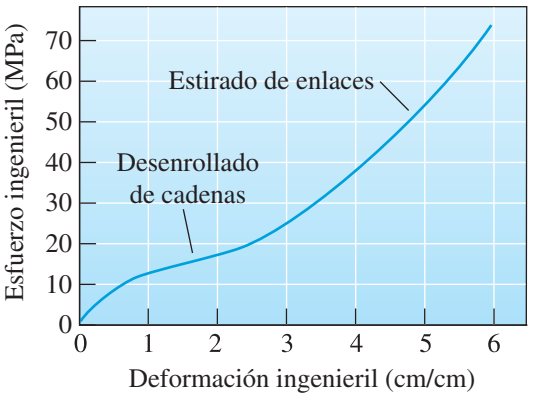


Figura 16-23 Curva de esfuerzo-deformación de un elastómero. Casi toda la deformación es elástica, por lo cual el módulo de elasticidad varía conforme cambia la deformación.

Elastómeros comunes

Los elastómeros, que son polímeros amorfos, no se cristalizan con facilidad durante su proceso; tienen una temperatura de transición vítrea baja y las cadenas pueden deformarse elásticamente con facilidad cuando se les aplica una fuerza. Las tablas 16-8 y 16-9 presentan las unidades de repetición, aplicaciones y propiedades de algunos de los elastómeros más comunes. El poliisopreno es un caucho natural. El policloropreno (o neopreno) es un material común para mangueras y aislamientos eléctricos. Muchos de los elastómeros sintéticos de importancia son copolímeros. El polibutadieno (caucho butadieno, o Buna-S) es similar al poliisopreno, pero la unidad de repetición tiene cuatro átomos consistentes en un enlace doble. Se trata de un caucho de costo relativamente bajo, pero su resistencia a los solventes no es buena, razón por la que se le usa como material endurecedor para fabricar otros elastómeros. El caucho butadieno-estireno (BSR o BS), que también es uno de los componentes del ABS (figura 16-10), se usa en la fabricación de neumáticos para automóvil, mientras que el caucho de butilo (o poliisobutadieno) se usa en la fabricación de cámaras para neumáticos, soportes contra la vibración y como material para aislar los efectos de la intemperie. Las siliconas son otro elastómero importante que se obtiene a partir de cadenas formadas por átomos de silicio y oxígeno. James Wright, de la General Electric, inventó el Silly Putty®, que se obtiene al utilizar siloxano de polidimetil terminado en hidroxilo, óxido bórico y otros adhesivos. A una velocidad reducida de deformación, se puede estirar de manera significativa, pero se romperá en cuanto se tire de él con rapidez. Los cauchos de silicona (también conocidos como polisiloxanos) resisten temperaturas altas, lo que permite el uso del elastómero a temperaturas de hasta 315ºC. Las siliconas de bajo peso molecular forman líquidos y se conocen como aceites de silicio. Las siliconas también se pueden adquirir como un sistema de dos partes que se puede moldear y curar. La goma de mascar contiene una base de caucho natural (butadieno-estireno) o acetato de polivinilo (APV).

Elastómeros termoplásticos [ETP]

Este es un grupo especial de polímeros que no se basan en enlaces cruzados para producir una gran deformación elástica. La figura 16-24 muestra la estructura de un copolímero de bloque de estireno-butadieno tratado de manera que las unidades de repetición de estireno se localizan sólo en los extremos de las cadenas. Aproximadamente 25% de la cadena está formada por estireno. Los extremos de estireno de varias cadenas forman dominios de forma esférica. El estireno tiene una alta temperatura de transición vítrea; en consecuencia, los dominios son resistentes y rígidos y mantienen unidas las cadenas. Las áreas de caucho que contienen unidades de repetición butadieno se localizan entre los dominios del estireno; estas partes del polímero tienen una temperatura de transición vítrea por debajo de la temperatura ambiente y, por tanto, son de comportamiento blando y acauchado. La deformación elástica se presenta mediante un movimiento recuperable de las cadenas; se evita el deslizamiento de éstas a bajas temperaturas, debido a los dominios del estireno.

Los copolímeros de bloque estireno-butadieno difieren del caucho BS en que no son necesarios los enlaces cruzados de los monómeros de butadieno y, de hecho, son indeseables. Cuando se calienta el elastómero termoplástico, el estireno se calienta por arriba de la temperatura de transición vítrea, se destruyen los dominios y el polímero se deforma viscosamente; esto es, se comporta como cualquier otro termoplástico, lo que facilita de manera considerable su fabricación. Cuando el polímero se enfría, vuelven a formarse los dominios y el polímero retoma sus características de

Tabla 16-8 Unidades de repetición y aplicaciones para elastómeros seleccionados

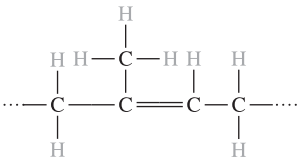
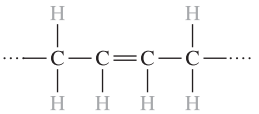
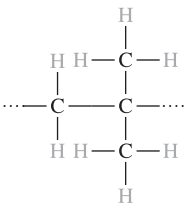
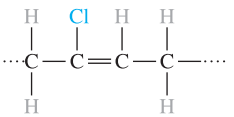
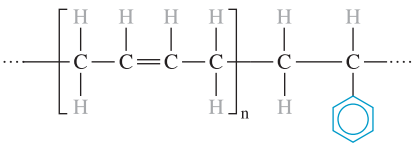
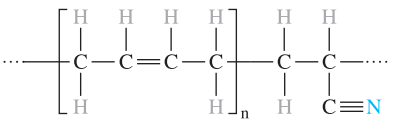
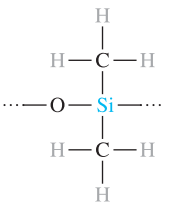
Polímero	Unidad de repetición	Aplicaciones
Poliisopreno		Neumáticos, pelotas de golf, suelas para zapatos.
Polibutadieno (o caucho butadieno o Buna-S)		Neumáticos industriales, endurecimiento de otros elastómeros, cámaras para neumáticos, tiras para impermeabilizar, mangueras para vapor.
Polisobutileno (o caucho butilo)		
Policloropreno (neopreno)		Mangueras, recubrimiento de cables.
Butadiene-styrene (BS or SBR rubber)		Neumáticos
Butadieno-acrilonitrilo (Buna-N)		Juntas, mangueras para combustible.
Siliconas		Juntas, sellos

Tabla 16-9 Propiedades de elastómeros seleccionados

	Resistencia a la tensión (MPa)	% de alargamiento	Densidad (g/cm^3)
Polisopreno	21	800	0.93
Polibutadieno	24		0.94
Poliisobutileno	28	350	0.92
Policloropreno	24	800	1.24
Butadieno-estireno	21	2000	1.0
Butadieno-acrilonitrilo	5	400	1.0
Siliconas	7	700	1.5
Elastómeros termoplásticos	35	1300	1.06

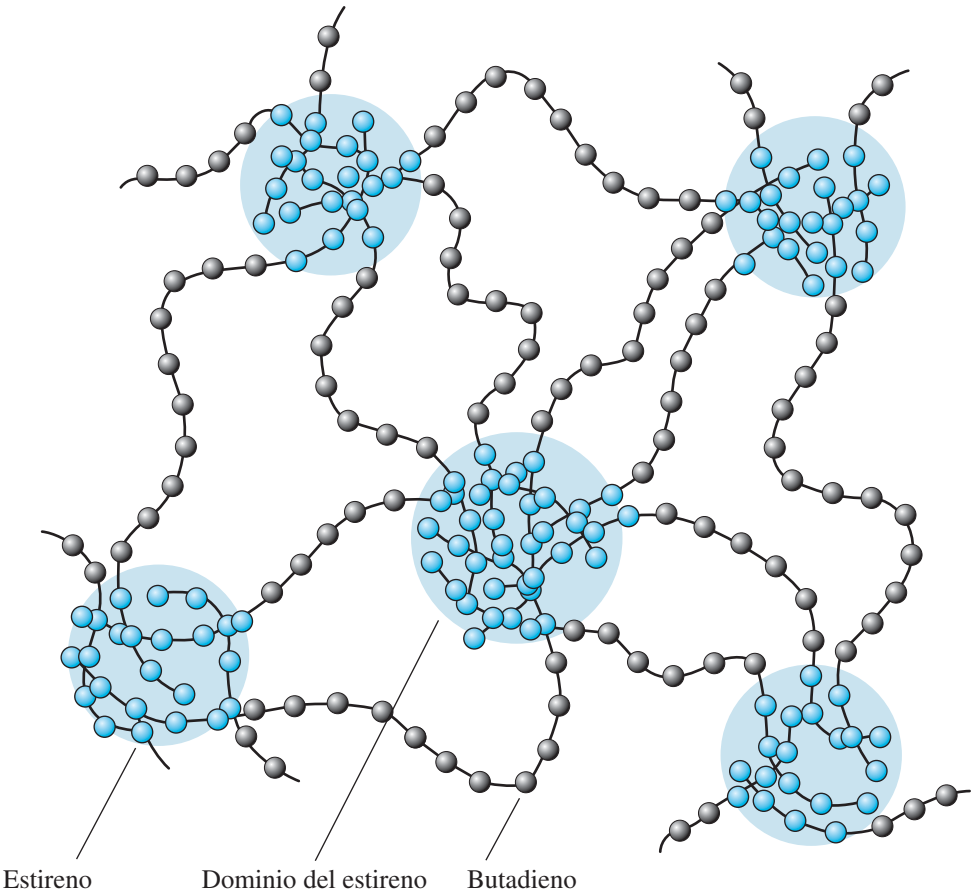


Figura 16-24 Estructura del copolímero estireno-butadieno en un elastómero termoplástico. La naturaleza vítrea de los dominios del estireno le da un comportamiento elástico sin los enlaces cruzados del butadieno.

elastómero. En consecuencia, los elastómeros termoplásticos se comportan como termoplásticos normales a temperaturas altas, y como elastómeros a bajas temperaturas. Este comportamiento también permite que los elastómeros termoplásticos se reciclen con mayor facilidad que los convencionales.

16-9 Polímeros termoestables o termofijos

Los polímeros termoestables, conocidos también como termofijos, están formados por cadenas de polímeros con gran cantidad de enlaces cruzados que forman la estructura de red tridimensional. En vista de que las cadenas no pueden girar ni deslizarse, estos polímeros poseen buena resistencia, rigidez y dureza, pero también tienen malas propiedades de ductilidad e impacto, así como una temperatura de transición vítrea elevada. En un ensayo a la tensión, los polímeros termoestables presentan el mismo comportamiento que un metal o material cerámico frágil.

Los polímeros termoestables suelen iniciarse como cadenas lineales. Dependiendo del tipo de unidad de repetición y del grado de polimerización, el polímero inicial puede ser una resina sólida o líquida; en algunos casos se utiliza una resina líquida de dos o tres componentes (como en el caso de los tubos de pegamento epóxico). El calor, la presión, la mezcla de varias resinas y otros métodos inician el proceso de enlaces cruzados. Los enlaces cruzados no son reversibles; una vez formados, los termoestables no pueden reutilizarse o reciclarse de forma conveniente.

Tabla 16-10 Unidades funcionales y aplicaciones de termoestables seleccionados

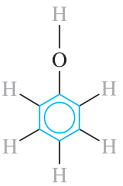
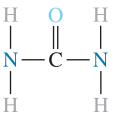
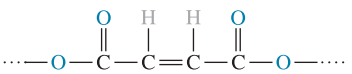
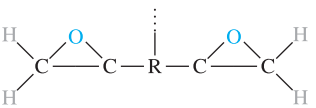
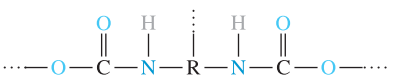
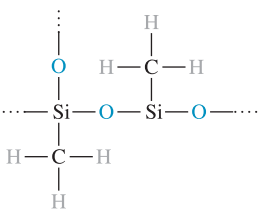
Polímero	Unidades funcionales	Aplicaciones comunes
Fenólicos		Adhesivos, recubrimientos, laminados.
Aminas		Adhesivos, utensilios de cocina, piezas eléctricas moldeadas
Poliésteres		Piezas eléctricas moldeadas, laminados decorativos, matrices poliméricas en la fibra de vidrio
Epóxicos		Adhesivos, piezas eléctricas moldeadas, matriz para materiales compuestos
Uretanos		Fibras, recubrimientos, espumas, aislantes
Silicones		Adhesivos, juntas, selladores

Tabla 16-11 Propiedades de polímeros termoestables comunes

	Resistencia a la tensión (MPa)	% elongación	Módulo elástico (MPa)	Densidad (g/cm^3)
Fenólicos	62	2	9	1.27
Aminas	69	1	11	1.50
Poliésteres	90	3	5	1.28
Epóxicos	103	6	4	1.25
Uretanos	69	6		1.30
Silicones	28	0	8	1.55

Los grupos funcionales para varios polímeros termoestables comunes se resumen en la tabla 16-10, y en la tabla 16-11 se muestran las propiedades representativas. Un grupo funcional es una distribución definida de átomos con un conjunto particular de propiedades.

Fenólicos

Los fenólicos, que son los termoestables de más uso, se utilizan con frecuencia como adhesivos, recubrimientos, laminados y componentes moldeados para aplicaciones eléctricas o de motores.

La baquelita es uno de los termoestables fenólicos más comunes. Una reacción de condensación que une las moléculas de fenol y de formaldehído produce la resina fenólica lineal inicial. Este proceso continúa hasta que se forma una cadena lineal de fenol-formaldehído; no obstante, el fenol

es trifuncional. Después de que se forma la cadena, existe un tercer sitio en cada anillo de fenol para el enlace cruzado con cadenas adyacentes.

Aminas

Las aminorresinas, que se producen al combinar monómeros de urea o de melanina con el formaldehído, se parecen a los fenólicos. Los monómeros se unen mediante un enlace formaldehído para producir cadenas lineales. El formaldehído excedente proporciona los enlaces cruzados requeridos para producir polímeros resistentes y rígidos, adecuados para adhesivos, laminados, materiales moldeados para utensilios de cocina y equipo eléctrico, como cortacircuitos, interruptores y placas para contactos y de pared.

Uretanos

Dependiendo del grado de entrecruzamiento de los enlaces, los uretanos se comportan como polímeros termoestables, como termoplásticos o como elastómeros. Estos polímeros tienen aplicaciones variadas como fibras, recubrimientos y espumas para muebles, colchones y aislamientos.

Poliésteres

Los poliésteres forman cadenas de moléculas de ácidos y de alcohol mediante una reacción de condensación, cuyo subproducto es agua. Cuando estas cadenas contienen enlaces no saturados, una molécula de estireno puede servir para proporcionar el enlace cruzado. Los poliésteres se usan como materiales para moldeo en diversas aplicaciones eléctricas, laminados decorativos, lanchas y otros equipos marinos, y como matriz para materiales compuestos, como la fibra de vidrio.

Epóxicos

Los epóxicos son polímeros termoestables formados a partir de moléculas que tienen un anillo cerrado C–O–C. Durante la polimerización, los anillos C–O–C se abren y los enlaces se reorganizan para unir las moléculas. El más común de los epóxicos comerciales se basa en el bisfenol A, al cual se le han añadido dos unidades epóxido. Estas moléculas se polimerizan para producir cadenas, y después se les hace reaccionar con agentes aceleradores del curado para obtener enlaces cruzados. Los epóxicos se utilizan como adhesivos, piezas moldeadas rígidas para aplicaciones eléctricas, componentes de automotores, tableros de circuitos y artículos deportivos, y como matriz para materiales compuestos reforzados de fibra de alto rendimiento para uso aeroespacial.

Poliimidas

Las poliimidas presentan una estructura en anillo que contiene un átomo de nitrógeno. Las bismaleimidas (**BMI**) constituyen un grupo especial e importante en las industrias aeronaval y aeroespacial. Pueden funcionar de manera continua a temperaturas de 175°C y no se desintegran hasta alcanzar los 460°C.

Interpenetración en redes de polímeros

Algunos materiales poliméricos especiales se pueden producir cuando las cadenas termoplásticas se entrelazan a través de una estructura termoestable, formando **interpenetración en redes de polímeros**. Por ejemplo, las cadenas de nylon, acetal y polipropileno pueden penetrar en un termoestable de silicona con enlaces cruzados. En sistemas más avanzados se pueden producir dos estructuras termoestables interpenetrantes.

16-10 Adhesivos

Los adhesivos son polímeros que se usan para unir otros polímeros, metales, materiales cerámicos, materiales compuestos o combinaciones de los anteriores. Se usan en diversas aplicaciones; los de uso más extenso son los “adhesivos estructurales”, que se emplean en la industria automotriz, aeroespacial, en electrodomésticos, en electrónica, en la construcción y en artículos deportivos.

Adhesivos químicamente reactivos

Estos adhesivos incluyen poliuretanos, epóxicos, fenólicos, anaeróbicos y poliimidas. Los sistemas de un solo componente están constituidos por una resina polimérica, que se cura por exposición a la humedad, al calor o, en el caso de los

anaeróbicos, por la ausencia de oxígeno. Los sistemas de dos componentes, como los epóxicos, se curan al combinarse dos resinas.

Adhesivos por evaporación o difusión El adhesivo se disuelve en un solvente orgánico o en agua y se aplica a las superficies que se desea unir. Al evaporarse el portador, el polímero restante crea la unión. Los adhesivos a base de agua tienen preferencia, tanto desde el punto de vista de consideraciones ambientales como de seguridad. El polímero puede estar totalmente disuelto en agua o consistir en un látex, una dispersión estable de polímero en el agua. Existe una amplia variedad de elastómeros, vinilos y acrílicos.

Adhesivos de fusión por calor Estos termoplásticos y elastómeros termoplásticos se funden si se calientan. Al enfriarse, el polímero se solidifica y une los materiales. Las temperaturas de fusión de estos adhesivos son de aproximadamente 80 a 110°C, lo que limita su uso a altas temperaturas. Los adhesivos de fusión por calor de alto rendimiento, como las poliamidas y los poliésteres, pueden usarse hasta una temperatura de 200°C.

Adhesivos sensibles a la presión Estos adhesivos son principalmente elastómeros o copolímeros de elastómero producidos en forma de película o recubrimientos. Para que el polímero se adhiera al sustrato requiere que se le aplique presión. Se utilizan para producir cintas eléctricas y de empaque, etiquetas, losetas para piso, recubrimientos para muros y laminados texturizados imitación madera. Los adhesivos removibles sensibles a la presión tienen aplicaciones médicas como vendajes y en la administración de medicamentos intramusculares.

Adhesivos conductores Un adhesivo polimérico puede contener un material de relleno (por ejemplo, escamas o polvo de plata, cobre o aluminio) para obtener conductividad eléctrica y térmica. En algunos casos se requiere buena conductividad térmica, pero no eléctrica. Para lograr esta combinación de propiedades pueden utilizarse materiales de relleno, como alúmina, nitruro de boro y sílice.

16-11 Procesamiento y reciclaje de polímeros

Existen varios métodos para producir formas de polímeros, incluyendo el moldeo, la extrusión y la manufactura de películas o fibras. Las técnicas que se emplean para conformar polímeros dependen en gran medida de la naturaleza del polímero mismo, en particular si se trata de un termoplástico o de un termoestable. En la conformación de los polímeros termoplásticos se usan casi todas las técnicas. El polímero se calienta casi hasta la temperatura de fusión, o por encima de ésta, a fin de que se torne ahulado o líquido; entonces se vacía en un molde o una matriz para darle la forma requerida. Los elastómeros termoplásticos se pueden formar con el mismo procedimiento. En estos procesos se puede reciclar el desecho con facilidad, lo que minimiza el desperdicio. En los polímeros termoestables se emplean menos técnicas de conformado, dado que, una vez que se presentan los enlaces cruzados, los polímeros termoestables ya no se pueden conformar.

A continuación se citan algunas de las técnicas utilizadas principalmente para el procesamiento y moldeo de los polímeros; como puede observarse, casi todas estas técnicas son aplicables sólo a polímeros termoplásticos (figura 16-25).

Extrusión Esta técnica es la que más se utiliza en el procesamiento de termoplásticos. La extrusión puede tener dos finalidades: primero, es un modo de conformar ciertas figuras de manera continua [figuras 16-25*a*) y 16-26]; y en segundo término, al procesar polímeros que después utilizarán otros procesos, la extrusión proporciona un mezclador excelente para los aditivos. Un mecanismo de tornillo formado por un par de tornillos (extrusión mediante tornillos múltiples) obliga a pasar el termoplástico caliente, ya sea sólido o líquido, así como los aditivos, por la abertura de un dado de extrusión para producir formas sólidas, películas, hojas, tubos o tuberías (figura 16-26).

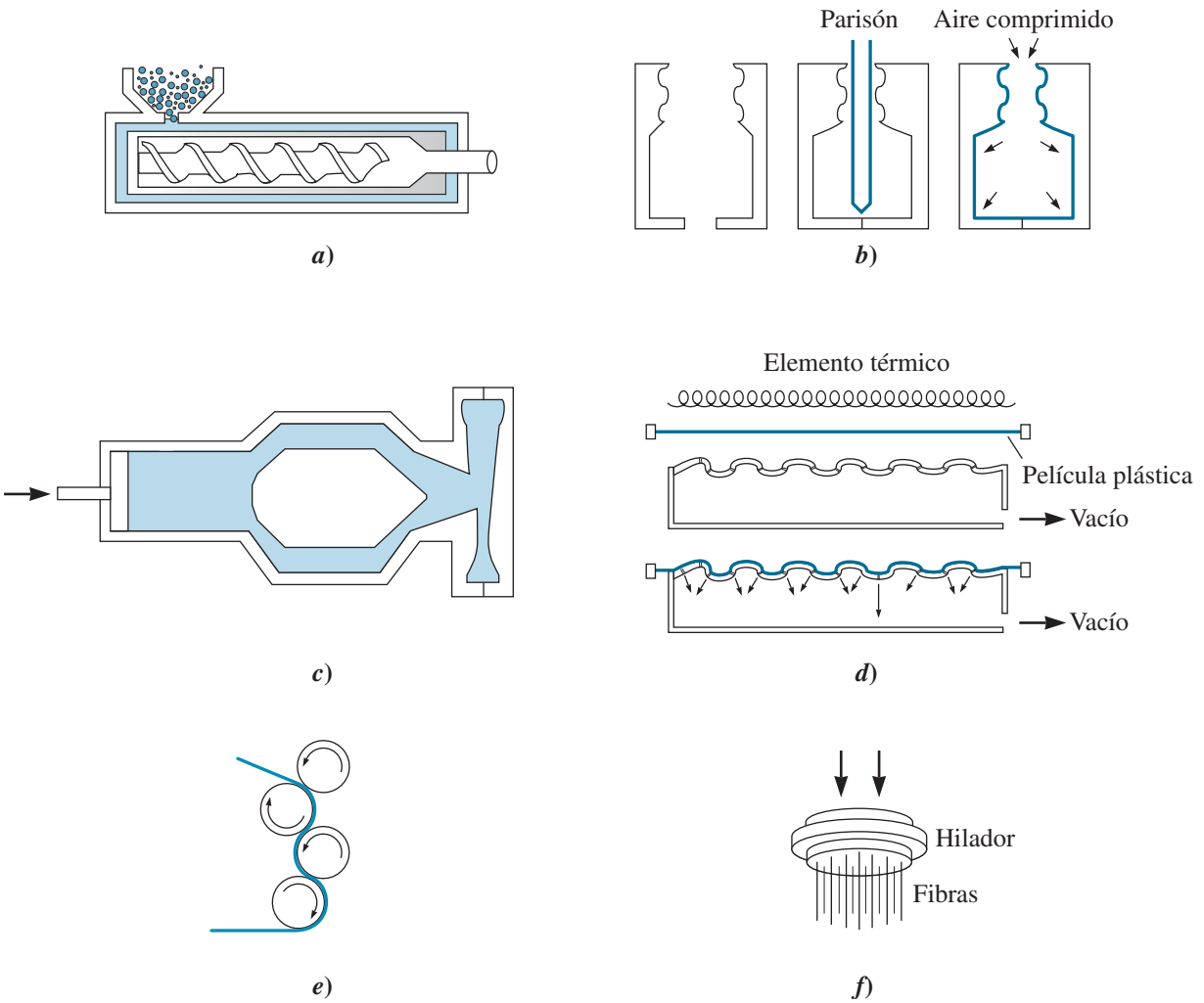


Figura 16-25 Procesos comunes de formación de termoplásticos: *a*) extrusión, *b*) moldeo por soplado, *c*) moldeo por inyección (no se muestra el barril de extrusión), *d*) termoformado, *e*) calandrado y *f*) hilado.

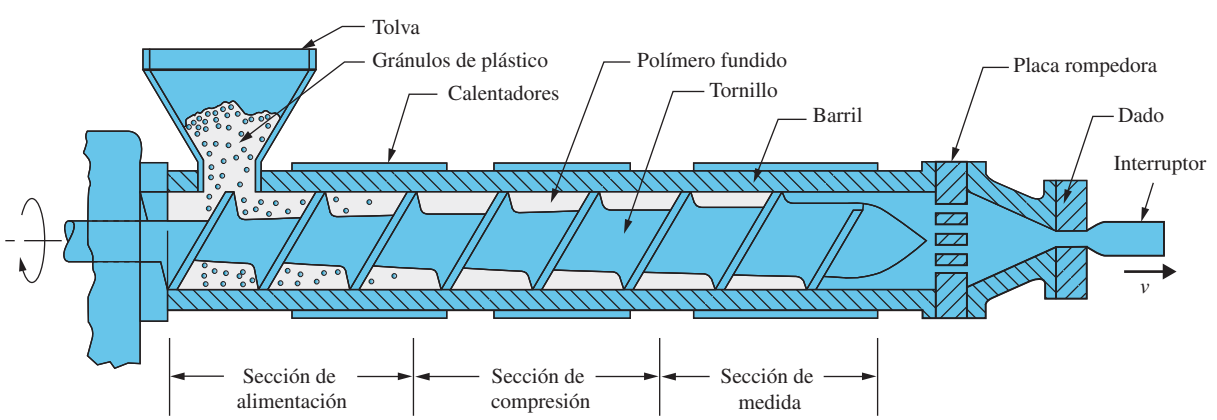


Figura 16-26 Esquema de una máquina de extrusión que se usa para el procesamiento de polímeros. (*Tomada de Mikell P. Groover,* Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, *3a edición. John Wiley & Sons, Inc., 2007.*)

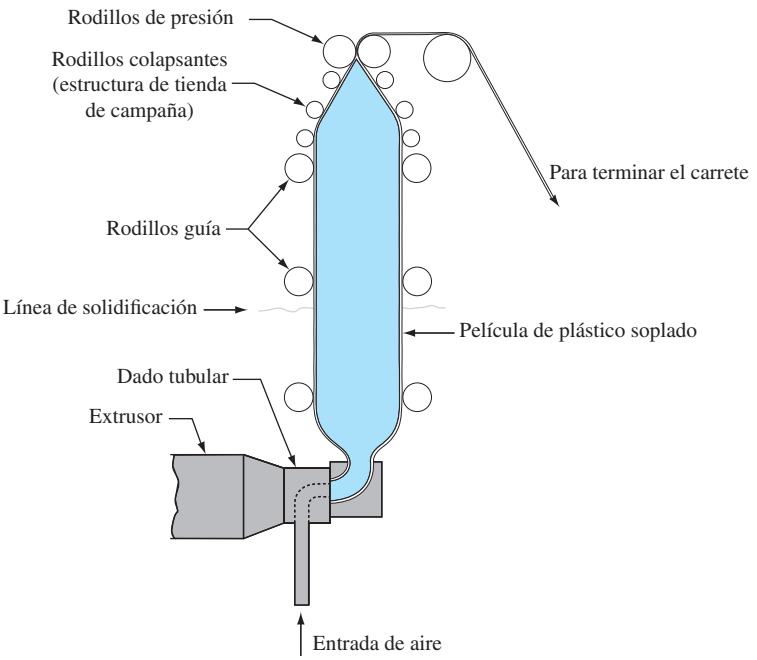


Figura 16-27 Proceso de extrusión de película por soplado. Un polímero termoplástico se extruye hacia arriba en forma de tubo. Se sopla aire en el tubo para que se expanda y enfríe. Las bolsas plásticas se producen de esta manera. (*Tomada de Mikell P. Groover,* Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, *3a edición. John Wiley & Sons, Inc., 2007*.)

Una máquina de extrusión puede medir de 18 a 21 m de largo y 60 cm de diámetro, e incluir varias zonas diferentes de enfriamiento y calentamiento. En vista de que los polímeros termoplásticos presentan un comportamiento de adelgazamiento por cortante y son viscoelásticos, la extrusión de los polímeros es un factor determinante en el control de la temperatura y la viscosidad. La figura 16-27 muestra un proceso especial de extrusión para la producción de películas. La extrusión también se puede utilizar para recubrir alambres y cables, ya sea con polímeros termoplásticos o elastómeros.

Moldeo por soplado

Una preforma hueca de termoplástico, conocida como **parisón**, se introduce en un molde utilizando presión de gas y se expande contra las paredes del molde [figura 16-25*b*).] Este proceso se utiliza para la producción de botellas, recipientes, depósitos de combustible para automóviles y otras formas huecas de plástico.

Moldeo por inyección

Los polímeros termoplásticos calentados a temperaturas superiores a la de fusión, mediante una máquina de extrusión, son forzados a entrar en una matriz cerrada para producir una pieza [figura 16-25*c*)]; este proceso es similar a la fundición o inyección a presión de metales. Un émbolo o algún mecanismo especial de tornillo aplican presión para obligar al polímero caliente a entrar en la matriz. De esta manera se produce una amplia diversidad de productos, desde tazas, peines y engranes hasta botes para basura.

Termoformado

Las hojas de polímero termoplástico, calentadas hasta la región plástica, pueden conformarse sobre un molde para producir productos tan diversos como empaques para huevo y paneles decorativos. El conformado puede efectuarse utilizando matrices, vacío [figura 16-25*d*)] o presión de aire.

Calandrado

En una calandria se vierte plástico fundido en un juego de rodillos que tienen entre sí una pequeña abertura (figura 16-25*e*). Los rodillos, que pueden estar realzados con algún dibujo, presionan el material y forman una hoja delgada de polímero, que con frecuencia es de cloruro de polivinilo. Con este método se fabrican losetas para piso y cortinas para baño.

Hilado Mediante el hilado es posible producir filamentos, fibras e hilos [figura 16-25*f*)]. Se hace pasar el polímero termoplástico por un dado que tiene gran cantidad de pequeñas perforaciones. El dado, conocido como **hilador**, puede girar y producir un hilo trenzado. En el caso de algunos materiales (incluso el nylon), el hilo puede ser estirado después con la finalidad de alinear las cadenas de polímero paralelamente al eje del hilo; este proceso incrementa la resistencia de las fibras.

Colado Muchos polímeros se pueden vaciar en moldes y permitir que solidifiquen. Los moldes pueden ser placas de vidrio para producir láminas individuales de plástico, o bandas de acero inoxidable en movimiento para el colado continuo de hojas más delgadas. Un proceso especial de colado es el *moldeo centrífugo*, en el que el plástico fundido se vierte en un molde que gira sobre dos ejes. La fuerza centrífuga empuja al polímero contra las paredes del molde, produciendo una forma delgada (por ejemplo, el techo de un vehículo recreativo).

Moldeo por compresión Las piezas moldeadas termoestables se conforman con frecuencia mediante la colocación del material sólido en una matriz caliente, antes de presentarse el enlace cruzado. La aplicación de una alta presión a alta temperatura hace que el polímero se funda, llene la matriz y de inmediato comience a endurecerse. Mediante este proceso pueden producirse pequeños receptáculos eléctricos, así como salpicaderas, cofres y paneles laterales para automóvil [figura 16-28*a*)].

Moldeo por transferencia En este moldeo se utiliza una doble cámara para la transferencia de polímeros termoestables. El polímero se calienta bajo presión en una de las cámaras. Después de fundirse, se inyecta en la cavidad del dado anexo. Este proceso permite obtener algunas de las ventajas del moldeo por inyección para polímeros termoestables [figura 16-28*b*)].

Moldeo de inyección por reacción [MIR] Los polímeros termoestables en forma de resina se inyectan primero en un mezclador, y de ahí de forma directa a un molde caliente, para obtener una figura. En el molde ocurren de manera simultánea tanto el conformado como el

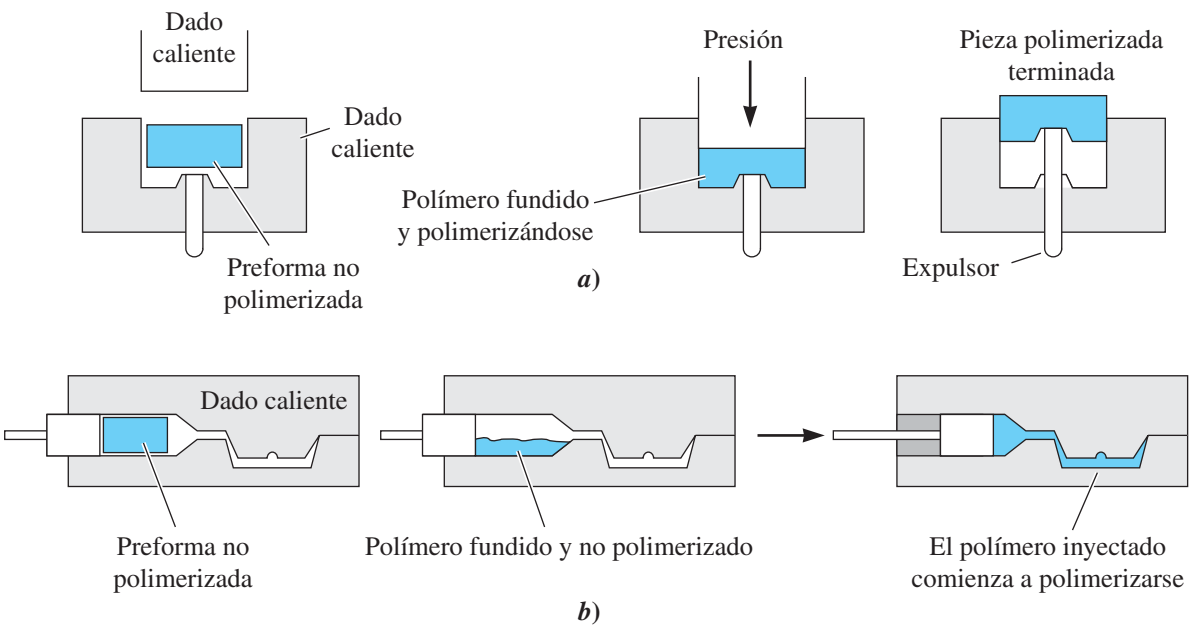


Figura 16-28 Procesos comunes de formado para polímeros termoestables: *a*) moldeo por compresión y *b*) moldeo por transferencia.

Ejemplo 16-10 *Paneles aislantes para uso doméstico*

Se desea diseñar un material que pueda utilizarse en la fabricación de paneles aislantes de aproximadamente 120 cm de ancho por 240 cm de alto. El material debe proporcionar un buen aislamiento térmico. ¿Qué material seleccionaría usted?

SOLUCIÓN

Los vidrios tienden a ser buenos aisladores del calor; sin embargo, son pesados, costosos y frágiles. Los polímeros son ligeros, de fabricación económica y pueden ser buenos aislantes térmicos. Se puede usar espuma de poliestireno, ya que el aire contenido en los poros aumenta de forma significativa su eficiencia como aislante térmico. Para obtener mejores propiedades mecánicas, podrían producirse espumas con una densidad relativamente alta (en comparación con las espumas que se emplean para elaborar vasos desechables para café). Finalmente, desde un punto de vista de seguridad, hay que cerciorarse de que se agreguen a dichas espumas algunos retardadores de flama y fuego. Estos paneles se hacen utilizando cuentas expandidas de poliestireno que contienen pentano, para lo cual se utiliza un proceso de moldeo. Las láminas pueden cortarse en los tamaños requeridos usando un alambre de metal caliente.

fraguado. En el moldeo de inyección por reacción reforzada (MIRR), se introduce en la cavidad del molde un material de refuerzo formado por partículas o por fibras cortas, y se impregna de resinas líquidas para producir un material compuesto. Mediante este proceso se fabrican defensas y salpicaderas para automóvil, así como piezas para muebles.

Espumas Es posible fabricar productos en forma de espumas con poliestireno, uretanos, polimetilmetacrilato y otros polímeros. El polímero adquiere la forma de pequeñas esferas que contienen un agente espumante (por ejemplo, el pentano). Durante el proceso de preexpansión, las esferas aumentan hasta 50 veces su diámetro. Las esferas preexpandidas se inyectan entonces en un dado, donde se funden mediante vapor para generar productos excepcionalmente ligeros, con densidades mínimas de hasta sólo 0.02 g/cm^3. Los vasos de poliestireno expandido (PE), el material de empaque y el de aislamiento son algunas de las aplicaciones para las espumas. Los bloques de motor para automóviles se fabrican con ayuda de un molde hecho de esferas expandidas de poliestireno con un proceso similar al moldeo de precisión.

Reciclaje de plásticos El reciclaje es un proceso de gran importancia que tiene un papel preponderante en la vida cotidiana, por lo que un análisis completo de dicho proceso queda fuera del alcance de este libro. Los materiales se reciclan de muchas maneras; por ejemplo, una parte del polímero de desecho proveniente de un proceso de manufactura (conocido como remolido) se usa en las plantas de reciclaje. El reciclaje de los materiales termoplásticos es relativamente sencillo y de práctica común. Muchos de los productos plásticos de uso cotidiano (bolsas, botellas de bebida refrescante, recipientes para yogurt, etc.) tienen un número estampado sobre su superficie. Para los productos PET (símbolo del reciclaje "PETE", a causa de problemas de marcas registradas), el número es el 1. Para el HDPE, vinilo (símbolo de reciclaje V), LDPE, PP y PS los números son 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente. Otros plásticos se identifican con el número 7.

Los plásticos termoestables y los elastómeros son más difíciles de reciclar, aunque todavía se pueden usar. Por ejemplo, los neumáticos pueden desmenuzarse y usarse en la elaboración de pisos para patios de recreo o carreteras más seguras.

A pesar de los enormes esfuerzos encaminados a un reciclaje eficaz, gran parte de los terrenos con rellenos sanitarios contienen plásticos (los más abundantes son los desperdicios de papel). En vista del carácter limitado de los recursos petrolíferos, de la amenaza del calentamiento global y de la necesidad de un ambiente más limpio y seguro, es importante hacer un uso cuidadoso de los materiales plásticos y procurar su reciclaje.

Resumen

- Los polímeros se elaboran a partir de grandes moléculas obtenidas al unir moléculas de menor tamaño, llamadas monómeros, mediante reacciones de polimerización por adición o condensación. Los *plásticos* son materiales derivados de compuestos poliméricos, y que además contienen muchos aditivos que mejoran sus propiedades. En comparación con la mayoría de los metales y materiales cerámicos, los plásticos tienen resistencia y rigidez bajas, y una temperatura de fusión también baja; asimismo, presentan densidad baja y buena resistencia química. Los plásticos se usan en una gran variedad de tecnologías.
- Los materiales termoplásticos tienen cadenas que no están químicamente unidas entre sí, lo que permite que el material pueda ser fácilmente conformado en figuras útiles, que tenga una buena ductilidad y pueda ser reciclado de manera económica. Los termoplásticos pueden tener una estructura amorfa, lo que les proporciona una baja resistencia y una buena ductilidad cuando la temperatura ambiente es superior a la de transición vítrea. Los polímeros son más rígidos y frágiles cuando la temperatura cae por debajo de la de transición vítrea. Muchos termoplásticos también pueden cristalizarse de manera parcial, ya sea durante el enfriamiento o por la aplicación de un esfuerzo, lo que incrementa su resistencia.
- Las cadenas termoplásticas pueden ser más rígidas y resistentes cuando se usan monómeros no simétricos, lo que incrementa la resistencia de la unión entre cadenas y dificulta que éstas se desenmarañen al aplicarles un esfuerzo. Además, muchos monómeros producen cadenas rígidas que contienen átomos o grupos de átomos distintos del carbono; esta estructura también produce termoplásticos de alta resistencia.
- Los elastómeros son materiales termoplásticos o termoestables con enlaces cruzados débiles que exhiben una deformación elástica superior a 200%. Mediante la vulcanización se producen enlaces cruzados en las cadenas. Estos enlaces hacen posible la obtención de deformaciones elásticas muy grandes sin alteración permanente. Si se incrementa el número de enlaces cruzados, aumenta la rigidez y se reduce la deformación elástica de estos materiales.
- Los elastómeros termoplásticos combinan características tanto de materiales termoplásticos como de elastómeros. A temperaturas altas, estos polímeros se comportan como materiales termoplásticos y se les puede conformar plásticamente; a bajas temperaturas se comportan como elastómeros.
- Los polímeros termoestables tienen múltiples enlaces cruzados en una estructura de red tridimensional. Por lo general, sus temperaturas de transición vítrea son altas, y aunque muestran buena resistencia, su comportamiento es frágil. Una vez completados los enlaces cruzados, estos polímeros ya no pueden reciclarse con facilidad.
- Los procesos de manufactura dependen del comportamiento de los polímeros. Procesos como la extrusión, el moldeo por inyección, el termoformado, el moldeo por vaciado, el calandrado y el hilado son posibles debido al comportamiento viscoelástico de los materiales termoplásticos. El comportamiento no reversible de las uniones en los polímeros termoestables limita su procesamiento a un número menor de técnicas (por ejemplo, moldeo por compresión, por transferencia y por inyección por reacción).

Glosario

Aramidas Polímeros poliamidas que contienen grupos de átomos aromáticos en la cadena lineal.

Coloreado (blanqueado) Cristalización de pequeños volúmenes de material termoplástico que se produce al ser doblado de manera repetida, lo que crea huecos que finalmente provocan la falla del material.

Comportamiento viscoelástico Deformación de un material por deformación elástica y flujo viscoso cuando se aplica un esfuerzo.

Copolímero Polímero por adición producido al unir más de un tipo de monómero.

Cristalización inducida por esfuerzo Proceso de formar cristales mediante la aplicación de un esfuerzo externo. Por lo general, una parte importante de numerosos plásticos amorfos se puede cristalizar en esta forma, haciéndolos más fuertes.

Dieno Grupo de monómeros que tienen enlaces covalentes dobles. Estos monómeros se usan con frecuencia en la producción de elastómeros.

Elastómeros Polímeros (termoplásticos o termoestables con pocos enlaces cruzados) que tienen una deformación elástica > 200%.

Elastómeros termoplásticos Polímeros que se comportan como materiales termoplásticos a altas temperaturas, pero como elastómeros a temperaturas bajas.

Enlace no saturado Enlace covalente doble, o incluso triple, que une a los átomos en una molécula orgánica. Cuando un solo enlace covalente reemplaza el enlace no saturado, puede ocurrir la polimerización.

Enlaces cruzados Unión de cadenas poliméricas entre sí para la producción de un polímero de red tridimensional.

Envejecimiento Degradación lenta de polímeros como resultado de una exposición a niveles bajos de calor, oxígeno, bacterias o rayos ultravioleta.

Grado de polimerización Peso molecular promedio de un polímero dividido entre el peso molecular del monómero.

Hiladora Dado de extrusión con muchas perforaciones pequeñas por las que se hace pasar un polímero caliente o fundido para producir filamentos. La rotación de la hiladora retuerce los filamentos y forma un hilo.

Interpenetración en redes de polímeros Estructuras poliméricas producidas al entrelazar dos estructuras o redes poliméricas diferentes.

Isómero geométrico Molécula que tiene la misma composición que otra molécula, pero no la misma estructura.

Mero Grupo unitario de átomos y moléculas que definen un arreglo característico para un polímero.

Microcavidad Deformación plástica localizada en un polímero.

Monómero Molécula a partir de la cual se produce el polímero.

Oligómero Molécula de bajo peso molecular que contiene dos meros (dimeros) o tres meros (trimeros).

Parisón Trozo caliente de polímero blando o fundido que es soplado o conformado en una forma útil.

Plástico Material predominantemente polimérico que incluye otros aditivos.

Polimerización por adición Proceso mediante el cual se forman cadenas de polímeros al juntar monómeros sin crear un subproducto.

Polimerización por condensación Mecanismo de polimerización en el que se condensa una molécula pequeña (por ejemplo, agua, metanol, etc.) como subproducto.

Polímero Material fabricado por moléculas gigantes (o macrocelulares) en forma de cadena, con pesos moleculares promedio de 10,000 a más de 1,000,000 g/mol, formados a partir de la unión de muchos meros o unidades mediante enlaces químicos. Por lo general, los polímeros se basan en el carbono, aunque no siempre.

Polímero lineal Cualquier polímero en el que las moléculas están colocadas en forma de cadenas parecidas a espaguetis.

Polímero ramificado Cualquier polímero formado por cadenas que a su vez están organizadas como una cadena principal, así como cadenas secundarias que se ramifican a partir de la primera.

Polímeros cristalinos líquidos Cadenas poliméricas excepcionalmente rígidas que actúan como varillas rígidas, incluso a temperaturas altas.

Polímeros termoestables Polímeros con muchos enlaces cruzados para producir una estructura de red tridimensional resistente.

Relajación de esfuerzos Reducción del esfuerzo que actúa durante un periodo sobre un material, con alteración constante debida a deformación viscoelástica.

Tacticidad Localización del polímero en la cadena o grupos de átomos en monómeros no simétricos.

Temperatura de deflexión Temperatura a la cual un polímero se deforma bajo una carga estándar (también llamada temperatura de *distorsión*).

Temperatura de degradación Temperatura a partir de la cual un polímero se quema, carboniza o desintegra.

Temperatura de transición vítrea Intervalo de temperatura por debajo del cual el polímero amorfo adopta una estructura vítrea rígida.

Termoplásticos Polímeros lineales o ramificados en los cuales las cadenas de moléculas no están entrelazadas.

Tiempo de relajación Propiedad de un polímero relacionada con la velocidad a la cual ocurre la relajación del esfuerzo.

Unidad de repetición Unidad estructural que se repite para elaborar un polímero. También se conoce como mero.

Vulcanización Cadenas de elastómeros con enlaces cruzados mediante la introducción de azufre u otros productos químicos.

Problemas

Sección 16-1 Clasificación de polímeros

16-1 ¿Qué son los polímeros lineales y los ramificados? ¿Los termoplásticos pueden ser ramificados?

16-2 Defina *a*) un plástico termoplástico, *b*) un plástico termoestable, *c*) elastómeros y *d*) elastómeros termoplásticos.

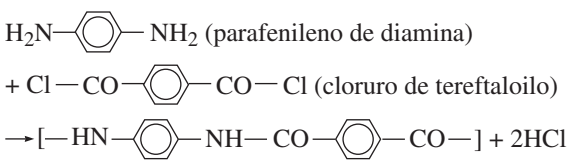
16-3 ¿En qué aplicaciones eléctricas y ópticas se usan polímeros? Explique mediante ejemplos.

16-4 ¿Cuáles son las ventajas principales de los plásticos en comparación con los materiales cerámicos, los vidrios y materiales metálicos?

Sección 16-2 Polimerización por adición

16-5 ¿Qué significan los términos polimerización por condensación, polimerización por adición, iniciador y terminador?

16-6 El kevlar ($C_{14}H_{10}N_2O_2$) se emplea en diversas aplicaciones, desde neumáticos hasta blindajes para carrocerías, por su alta relación entre resistencia y peso. El polímero se produce a partir de los monómeros de parafenileno de diamina ($C_6H_8N_2$) y cloruro de tereftaloílo ($C_8H_4Cl_2O_2$) por medio de la siguiente reacción:



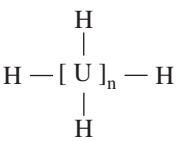
a) ¿Qué tipo de polimerización representa la reacción anterior?

b) Suponiendo 100% de eficiencia, calcule el peso del cloruro de tereftaloílo necesario para combinarse por completo con 1 kg de parafenileno de diamina.

c) ¿Cuánto kevlar se produce?

16-7 Analice la figura 16-6. ¿Cuánto metanol se produciría si se combinan 100 kg de cada reactivo y la reacción se completa al 100%?

16-8 ¿Cuál sería el peso molecular del polímero que se muestra a continuación cuando $n = 10^6$?



Observe que el uranio puede tener un estado de oxidación de +4.

Sección 16-3 Grado de polimerización

Sección 16-4 Termoplásticos comunes

16-9 Explique por qué el polietileno de baja densidad es bueno para fabricar bolsas para el supermercado y, sin embargo, debe usarse el polietileno de peso molecular super alto donde se requiera resistencia y muy alta resistencia al desgaste.

16-10 Revise de nuevo el ejemplo 16-5. ¿Cuáles son los grados de polimerización para el peso promedio molecular y el peso promedio molecular en números?

16-11 Calcule el número de cadenas en un tubo de PVC de 5 m de largo, con diámetro interior de 5 cm y un grosor de 0.5 cm, si el grado de polimerización es de 1000. Suponga que las cadenas son de igual longitud. La densidad del PVC es de 1.4 g/cm^3. La unidad de repetición del PVC se ilustra en la tabla 16-3.

16-12 El peso molecular del polimetilmetacrilato (vea la tabla 16-3) es de 250,000 g/mol. Si todas las cadenas poliméricas tienen una misma longitud, calcule

a) el grado de polimerización, y

b) el número de cadenas en 1 g del polímero.

16-13 El grado de polimerización del politetrafluoroetileno (vea la tabla 16-3) es de 7500. Si todas las cadenas de polímeros tienen la misma longitud, calcule

a) el peso molecular de las cadenas, y

b) el número total de cadenas en 1000 g del polímero.

16-14 Una cuerda de polietileno pesa 15.12 g por centímetro. Si cada cadena contiene 7000 unidades de repetición, calcule

a) el número de cadenas de polietileno en un tramo de 3 m de cuerda, y

b) la longitud total de cadenas dentro de la cuerda, suponiendo que los átomos de carbono en cada cadena están separados aproximadamente 0.15 nm y la longitud de una unidad de repetición es de 0.24495 nm.

16-15 El análisis de una muestra de poliacrilonitrilo (vea la tabla 16-3) indica que existen seis longitudes de cadenas, con la siguiente cantidad de cadenas para cada longitud. Determine

a) el peso molecular promedio en peso y el grado de polimerización, y

b) el peso molecular promedio por números y el grado de polimerización.

Número de cadenas	Peso molecular medio (g/mol)
10,000	3000
18,000	6000
17,000	9000
15,000	12,000
9000	15,000
4000	18,000

16-16 Calcule los pesos moleculares de las unidades de repetición de la tabla 16-3. Desarrolle su trabajo de forma completa.

16-17 Elabore un diagrama de la resistencia a la tensión de los polímeros de la tabla 16-2 en función del número de anillos aromáticos (de benceno) en el monómero.

Sección 16-5 Relaciones estructura–propiedades en termoplásticos

Sección 16-6 Efecto de la temperatura en termoplásticos

Sección 16-7 Propiedades mecánicas de los termoplásticos

16-18 Explique el significado de los siguientes términos: temperatura de descomposición, temperatura de distorsión térmica, temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión. ¿Cuál es la razón por la que los termoplásticos no tienen una temperatura fija de fusión o de transición vítrea?

16-19 A partir de los datos de la tabla 16-5, trace la relación entre las temperaturas de transición vítrea y las temperaturas de fusión de los termoplásticos por adición. ¿Cuál es la relación aproximada entre estas dos temperaturas críticas? ¿Los termoplásticos por condensación y los elastómeros siguen también la misma relación?

16-20 Elabore una lista de los polímeros por adición de la tabla 16-5 que pudieran ser buenos candidatos para elaborar la ménsula que sujeta el espejo retrovisor de un automóvil, suponiendo que las temperaturas bajan con frecuencia por debajo de 0°C. Justifique sus selecciones.

16-21 Con base en la tabla 16-5, ¿cuál de los elastómeros podría ser el adecuado para una junta en una bomba para CO_2 líquido a –78°C? Explique.

16-22 ¿Cómo se comparan las temperaturas de transición vítrea del polietileno, el polipropileno y el polimetilmetacrilato? Explique sus diferencias con base en la estructura del monómero.

16-23 ¿Cuáles de los polímeros por adición de la tabla 16-5 se utilizan en su estado correoso a temperatura ambiente? ¿Cómo debe esperarse que afecte esto las propiedades mecánicas de los polímeros por adición en comparación con las de los polímeros vítreos?

16-24 ¿Cuáles factores afectan la cristalinidad de los polímeros? Explique el desarrollo y el papel de la cristalinidad en el PET y en el nylon.

16-25 Describa las tendencias relativas a cristalizar de los siguientes polímeros. Explique su respuesta.

a) Polietileno ramificado en comparación con polietileno lineal.

b) Polietileno comparado con el copolímero de polietileno-polipropileno.

c) Polipropileno isotáctico comparado con polipropileno atáctico.

d) Polimetilmetacrilato comparado con acetal (polioximetileno).

16-26 La densidad cristalina del polipropileno es de 0.946 g/cm^3, y su densidad amorfa de 0.855 g/cm^3. ¿Cuál es el porcentaje en peso de la estructura que es cristalina en un polipropileno que tiene una densidad de 0.9 g/cm^3?

16-27 Si la rapidez de deformación en un polímero puede ser representada por

$$d\varepsilon/dt = \sigma/\eta + (1/E)d\sigma/dt$$

donde ε = deformación, σ = esfuerzo, η = viscosidad, E = módulo de elasticidad y t = tiempo, deduzca la ecuación 16-5, suponiendo deformación constante (es decir, $d\varepsilon = 0$). ¿De qué es función el tiempo de relajación (λ) en la ecuación 16-5?

16-28 Se carga un HDPE a 2.8MPa y se deja aparte. ¿Qué temperatura podría provocar la ruptura si se mantiene esta carga durante 100 horas? Vea la figura 16-18.

16-29 Un componente polímero, que necesita mantener un nivel de esfuerzo por encima de 10 MPa para el correcto funcionamiento de un conjunto, está programado para ser sustituido cada dos años como mantenimiento preventivo. Si el esfuerzo inicial era de 18 MPa y bajó a 15 MPa

después de un año de operación (suponiendo deformación constante), ¿evitará una falla la pieza de repuesto bajo el programa preventivo especificado?

16-30 Explique el significado de estos términos: termofluencia (fluencia lenta), relajación de esfuerzos, microcavidades, coloreado en polímeros, agrietamiento por esfuerzo provocado por el entorno y envejecimiento de los polímeros.

16-31 A un sujetador hecho de un polímero que se usa en un ensamble complejo se le aplica un esfuerzo de 17 MPa. A una deformación constante, el esfuerzo se reduce a 16.6 MPa después de 100 horas. Si para que la pieza funcione correctamente es necesario que el esfuerzo se mantenga por encima de 14.5 MPa, determine la vida del ensamble.

16-32 A un polímero que opera bajo una deformación constante se le aplica un esfuerzo de 7 MPa; después de seis meses, el esfuerzo baja a 5.9 MPa. Para una aplicación específica, una pieza fabricada a partir del mismo polímero debe conservar un esfuerzo de 6.2 MPa después de transcurridos 12 meses. ¿Cuál debería ser, para esta aplicación, el esfuerzo original que debe aplicársele?

16-33 En la figura 16-18 aparecen los datos para el tiempo de ruptura del polietileno. A un esfuerzo aplicado de 4.8 MPa, la figura indica que el polímero se rompe en 0.2 h a 90°C, pero a 65°C resiste 10 000 horas. Suponiendo que el tiempo de ruptura está relacionado con la viscosidad, calcule la energía de activación para la viscosidad del polietileno y estime el tiempo de ruptura a 23°C.

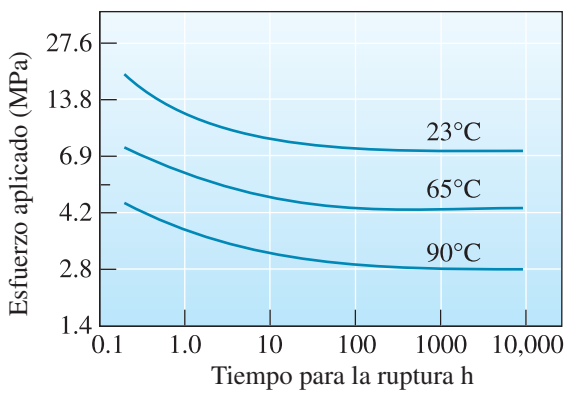


Figura 16-18 Efecto de la temperatura en el comportamiento de esfuerzo-ruptura de polietileno de alta densidad. (Repetida para los problemas 16-28 y 16-33.)

Sección 16-8 Elastómeros (cauchos)

16-34 El polímero ABS se puede elaborar con diferentes cantidades de monómeros de estireno, butadieno y acrilonitrilo, presentes en forma de dos copolímeros: caucho BS y SAN.

a) ¿Cómo se ajustaría la composición del ABS si se desea obtener buenas propiedades al impacto?

b) ¿Cómo se ajustaría la composición si se desea obtener buena ductilidad a temperatura ambiente?

c) ¿Cómo se ajustaría la composición si se desea obtener buena resistencia a temperatura ambiente?

16-35 La figura 16-23 muestra la curva esfuerzo-deformación de un elastómero. A partir de la curva, calcule y trace el módulo de elasticidad en función de la deformación y explique los resultados.

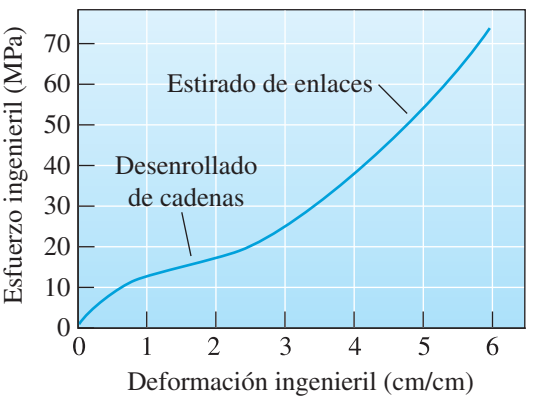


Figura 16-23 (Repetida para el problema 16-35.) Curva de esfuerzo-deformación para un elastómero. Prácticamente toda la deformación es elástica; el módulo de elasticidad varía conforme cambia la deformación.

Sección 16-9 Polímeros termoestables o termofijos

16-36 Explique el significado del término polímero termoestable. ¿Por qué no se puede producir un polímero termoestable utilizando sólo ácido adípico y etilenglicol?

16-37 Explique por qué no se utiliza de manera regular el grado de polimerización para definir los polímeros termoestables.

16-38 Defienda o contradiga la elección de los siguientes materiales como adhesivos fundidos en caliente para una aplicación en la que la pieza ensamblada estará sujeta a una carga tipo impacto:

a) polietileno;
b) poliestireno;
c) elastómero termoplástico estireno-butadieno;
d) poliacrilonitrilo, y
e) polibutadieno.

16-39 Compare las propiedades de los materiales termoplásticos, termoestables y los elastómeros.

Problemas de diseño

16-40 La figura 16-29 muestra el comportamiento del polipropileno, el polietileno y el acetal a dos temperaturas diferentes. Se desea producir una varilla de 30 cm de largo, de un polímero que funcionará a 40°C durante seis meses bajo una carga constante de 230 kg. Diseñe un material, así como el diámetro de la varilla, de modo que no ocurra más de 5% de alargamiento por termofluencia (fluencia lenta).

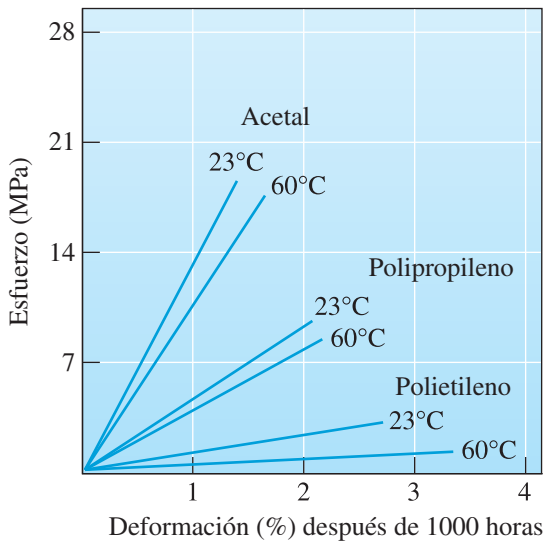


Figura 16-29 Efecto del esfuerzo aplicado sobre el porcentaje de deformación por termofluencia para tres polímeros (para el problema 16-40).

16-41 Diseñe un material polimérico que pueda usarse para producir un engrane de 7.5 cm de diámetro que habrá de utilizarse para transferir energía de un motor de baja potencia. ¿Cuáles son los requerimientos de diseño? ¿Qué clase de polímeros (termoplásticos, termoestables, elastómeros) serían apropiados? ¿Qué polímero en particular consideraría en primer término? ¿Qué información adicional relacionada con la aplicación y las propiedades de los polímeros debería conocerse para completar el diseño?

16-42 Diseñe un material polimérico, así como un proceso de formado o moldeo, para producir la cubierta para una computadora personal. ¿Cuáles son los requerimientos de diseño y de conformado? ¿Qué clase de polímeros serían los más apropiados? ¿Qué polímero en particular consideraría en primer término? ¿Qué información adicional necesita conocer?

16-43 ¿Qué tipo de polímero puede utilizarse para que cubra el interior de la cápsula para alojar la cabeza del fémur de una prótesis de cadera? Analice los requerimientos necesarios para este tipo de polímero.

Problemas por computadora

16-44 *Distribución del peso molecular de los polímeros.* Los siguientes datos se obtuvieron para el polietileno. Determine el peso molecular promedio y el grado de polimerización.

Intervalo del peso molecular (g/mol)	f_i	x_i
0–3000	0.01	0.03
3000–6000	0.08	0.10
6000–9000	0.19	0.22
9000–12,000	0.27	0.36
12,000–15,000	0.23	0.19
15,000–18,000	0.11	0.07
18,000–21,000	0.06	0.02
21,000–24,000	0.05	0.01

Edite un programa de cómputo o use una hoja de cálculo para resolver este problema.

Problemas Knovel[MR]

K16-1 Proporcione un ejemplo de un elastómero termoplástico (TPE) basado en una red polimérica interpenetrante (IPN). ¿Cómo está hecho?

K16-2 ¿Cómo afecta la longitud de cadena a la temperatura de transición vítrea de los polímeros? Encuentre una ecuación que describa esta relación.

K16-3 Los fenólicos bloqueados son antioxidantes orgánicos comunes. ¿Para qué clases de plástico se usan?

En un esfuerzo por incrementar la eficiencia y reducir los costos de combustible, las empresas de la industria aeroespacial buscan incorporar en aviones materiales más ligeros y fuertes. Una de las principales innovaciones del Boeing 787 es el amplio uso de materiales compuestos, que se obtienen al agregar componentes de fase múltiple en un material, de modo tal que las propiedades del material resultante son únicas y no pueden obtenerse de otro modo. Los compuestos constituyen la mitad del peso total del *Dreamliner*. Por ejemplo, el fuselaje del Boeing 787 está hecho de plástico reforzado con fibras de carbono, que es un compuesto de fibra de carbono en una matriz epóxica. Las fibras de carbono proporcionan resistencia y rigidez al material, y la matriz epóxica enlaza las fibras. (*AFP/Getty Images*)

CAPÍTULO

17

Materiales compuestos: trabajo en equipo y sinergia en materiales

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Cuáles son algunos de los materiales compuestos existentes de manera natural?*
- *¿Por qué la concha del abulón, constituida principalmente de carbonato de calcio, es mucho más fuerte que la tiza, que también es de carbonato de calcio?*
- *¿Por qué algunos artículos deportivos están hechos de materiales compuestos?*
- *¿Por qué los materiales compuestos se usan cada vez más en aviones y automóviles?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Explicar la forma en que los materiales compuestos alcanzan mejores niveles de resistencia general, resistencia a la fatiga, propiedades elásticas y relaciones de resistencia-peso en comparación con los materiales que los componen.
- Describir la morfología de los materiales compuestos particulados, laminados y reforzados con fibras.
- Utilizar la regla de las mezclas para calcular diferentes propiedades de los materiales compuestos.
- Calcular el módulo de elasticidad de los compuestos reforzados con fibras con direcciones de fibra paralelas y perpendiculares.
- Describir el proceso de fabricación de los compuestos de fibras y reforzados con fibras.
- Describir el proceso de fabricación de los compuestos laminados y reforzados con láminas.
- Identificar las aplicaciones para diferentes tipos de materiales compuestos.

Los compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para obtener una combinación de propiedades que no se puede lograr de otra manera. Los compuestos se pueden seleccionar para alcanzar combinaciones no usuales de rigidez, peso, densidad, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza

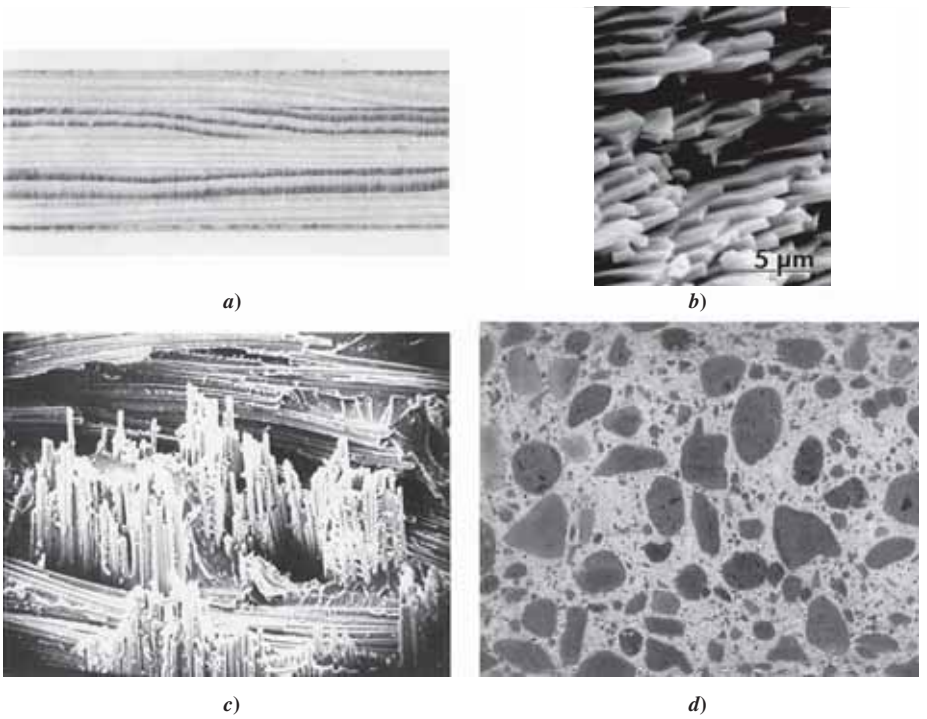


Figura 17-1 Algunos ejemplos de compuestos: *a*) el triplay o madera contrachapada es un compuesto laminado de capas de chapa de madera; *b*) la concha de abulón es un compuesto de plaquetas aragoníticas ($CaCO_3$-ortorrómbicas) rodeadas por capas de 10 nm de grueso de una matriz orgánica proteinácea (*cortesía del profesor Mehmet Sarikaya, Universidad de Washington, Seattle*); *c*) la fibra de vidrio es un compuesto reforzado con fibras de vidrio rígidas y fuertes en una matriz más blanda de polímero (175×), y *d*) el concreto es un material compuesto de partículas de arena gruesa o grava en una matriz de cemento (reducida en 50%). [*Las imágenes a*), *c*) *y d*) *son reimpresas por cortesía de Don Askeland.*]

o conductividad. La concha del abulón, la madera, el hueso y los dientes son ejemplos de materiales compuestos de origen natural. En la figura 17-1 se ilustran las microestructuras de compuestos seleccionados. Un ejemplo de un material que a macroescala sería un compuesto es el hormigón armado. Los compuestos a microescala incluyen materiales como los plásticos reforzados con fibra de carbono o con fibra de vidrio (PRFC o PRFV). Éstos ofrecen ventajas significativas en resistencias específicas y su uso se ha incrementado en aviones, componentes electrónicos, automotores y artículos para deportes.

Como se mencionó en los capítulos 12 y 13, las aleaciones endurecidas por dispersión (como los aceros) y endurecidas por precipitación son ejemplos de materiales tradicionales **nanocompuestos**. En un nanocompuesto, la **fase dispersa** está formada por partículas a nanoescala distribuidas en una **fase matriz**. Muchos cerámicos vítreos son compuestos a nanoescala de diferentes fases de materiales cerámicos; otros pueden considerarse también como compuestos. Por ejemplo, el Dylark^{MR} es un material compuesto de anhídrido maleico y un copolímero del estireno. Contiene negro de carbono para incrementar su rigidez y protegerlo contra los rayos ultravioleta. También contiene fibra de vidrio a fin de aumentar el módulo de Young y caucho para su tenacidad. Los materiales epóxicos pueden llenarse de plata para incrementar su conductividad térmica. Algunos materiales dieléctricos se obtienen mediante múltiples fases, de manera que las propiedades dieléctricas generales de interés (por ejemplo, la constante dieléctrica) no cambian de forma considerable con la temperatura (dentro de cierto intervalo). Algunas estructuras compuestas pueden estar formadas por diferentes materiales acomodados en capas distintas. Este tipo de estructuras se conocen como materiales y estructuras funcionalmente graduadas. Por ejemplo, el recubrimiento de zirconia estabilizada con itrio (YSZ) en un álabe de turbina tendrá otras capas intermedias que aportan la unión con el material de dicho

álabe. El recubrimiento de YSZ en sí contiene niveles de porosidad que son esenciales para dar protección contra altas temperaturas (capítulo 5). Del mismo modo, los recubrimientos en vidrio son ejemplos de estructuras compuestas. De este modo, el *concepto* de usar compuestos es genérico y puede aplicarse a escalas macro, micro y nano.

En los compuestos son importantes las propiedades y fracciones volumétricas de cada fase individual; también es significativa la conectividad de las fases. En general, la fase matriz es la fase continua y la otra fase es la fase dispersa. De este modo, el término "matriz metálica" indica un material metálico utilizado para formar la fase continua.

La conectividad se refiere a la forma en que dos o más fases están interconectadas en el compuesto. Los compuestos suelen clasificarse en función de la forma o la naturaleza de la fase dispersa (por ejemplo, compuestos reforzados con partículas, bigotes o con fibras). Los **bigotes** son como las fibras, aunque su tamaño es mucho menor. La unión entre partículas, bigotes o fibras y la matriz también es muy importante. En compuestos estructurales se usan moléculas poliméricas conocidas como "agentes de acoplamiento". Estas moléculas forman uniones con la fase dispersa y se integran también en la fase matriz continua.

El énfasis en este capítulo está principalmente en compuestos utilizados en aplicaciones estructurales o mecánicas. Los compuestos se pueden organizar en tres clases: con partículas, con fibras y laminares, con base en las formas de los materiales (figura 17-1). El concreto, que es una mezcla de cemento y grava, es un material particulado; la fibra de vidrio, con fibras de vidrio incrustadas en un polímero, es un compuesto reforzado con fibras, y el triplay o madera contrachapada, con capas alternas de chapa de madera, es un compuesto laminar. Si las partículas de refuerzo están distribuidas de manera uniforme, los materiales compuestos particulados tienen propiedades isotrópicas; los compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos; los compuestos laminares siempre presentan un comportamiento anisotrópico.

17-1 Materiales compuestos endurecidos por dispersión

Un grupo especial de nanocompuestos endurecidos por dispersión y que contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro se clasifican como compuestos particulados. Estos **dispersoides**, por lo general un óxido metálico, se introducen en la matriz por medios distintos de las transformaciones de fase tradicionales (capítulos 12 y 13). Aun cuando las pequeñas partículas no son coherentes en relación con la matriz, bloquean el movimiento de dislocaciones y producen un efecto endurecedor pronunciado.

A temperatura ambiente, los compuestos endurecidos por dispersión pueden ser más débiles que las aleaciones tradicionales de endurecimiento por envejecimiento, que contienen un precipitado coherente. Sin embargo, dado que los compuestos no se ablandan de forma catastrófica por exceso de envejecimiento o de revenido, crecimiento de granos o engrosamiento de la fase dispersa, su resistencia se reduce sólo de manera gradual al incrementarse la temperatura (figura 17-2). Además, su resistencia a la termofluencia (fluencia lenta) es superior a la de los metales y las aleaciones.

El dispersoide debe tener baja solubilidad en la matriz y no debe reaccionar químicamente con ésta, pero una pequeña cantidad de solubilidad podría ayudar a mejorar los enlaces entre el dispersante y la matriz. El óxido de cobre (Cu_2O) se disuelve en el cobre a altas temperaturas, por lo cual el sistema Cu_2O-Cu no resultaría eficaz. El Al_2O_3 no se disuelve en aluminio. Sin embargo, con el Al_2O_3 sí se obtiene un eficaz material endurecido por dispersión.

Ejemplos de materiales compuestos endurecidos por dispersión

La tabla 17-1 presenta algunos materiales de interés. Quizá el ejemplo clásico es el compuesto de polvo de aluminio sinterizado (PAS). Éste tiene una matriz de aluminio endurecida con hasta 14% de Al_2O_3. El compuesto se conforma al utilizar metalurgia de polvos. En un primer método se mezclan polvos de aluminio y alúmina, se compactan a alta presión y se sinterizan. En una segunda técnica, el polvo de aluminio se trata para agregar una película continua de óxido en cada partícula. Una vez compactado el polvo, la película de óxido se rompe durante el sinterizado en minúsculas escamas rodeadas por el metal de aluminio.

Otro grupo importante de compuestos endurecidos por dispersión incluye los metales de toria dispersa (TD), como el níquel TD (figura 17-3). El níquel TD puede producirse mediante

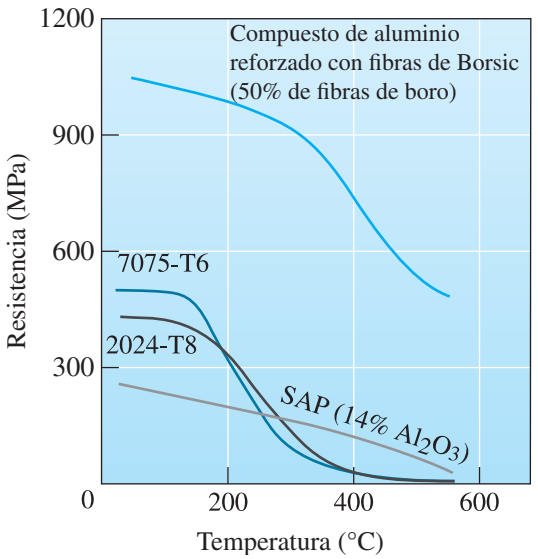


Figura 17-2 Comparación de resistencia a la fluencia del compuesto de polvo de aluminio sinterizado (PAS) y endurecido por dispersión, contra la resistencia a la fluencia de dos aleaciones de aluminio de alta resistencia convencionales de dos fases. El compuesto tiene beneficios a una temperatura superior a 300ºC. Para efectos de comparación, se ilustra un compuesto de aluminio reforzado con fibras.

Tabla 17-1 Aplicaciones de materiales compuestos seleccionados, endurecidos por dispersión

Sistema	Aplicaciones
Ag-CdO	Materiales para contactos eléctricos
Al-Al_2O_3	Posible uso en reactores nucleares
Be-BeO	Reactores aeroespaciales y nucleares
Co-ThO_2, Y_2O_3	Posible uso en materiales magnéticos resistentes a la fluencia lenta
Ni-20% Cr-ThO_2	Componentes de motores de turbina
Pb-PbO	Rejillas para batería
Pt-ThO_2	Filamentos, componentes eléctricos
W-ThO_2, ZrO_2	Filamentos, calefactores

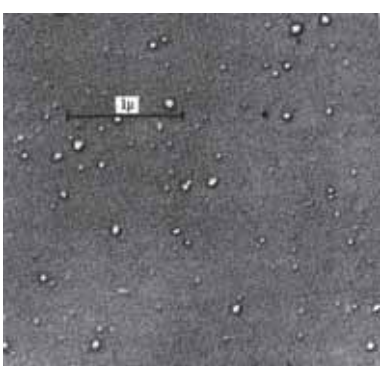


Figura 17-3 Micrografía electrónica del níquel TD. (*Cremens, W. S.; Norris, L. F.; Weeton, J. W. "Overlay copy technique to provide high-contrast electron micrographs for automatic metallographic analysis,"* NASA Technical Report, *Glenn Research Center, 1966.*)

oxidación interna. El torio está presente en el níquel como elemento de aleación. Una vez obtenido en forma de polvo compacto, se permite la difusión del oxígeno dentro del metal para que reaccione con el torio y produzca toria (ThO_2). El siguiente ejemplo ilustra los cálculos relacionados con un compuesto endurecido por dispersión.

Ejemplo 17-1 *Material compuesto de níquel TD*

Suponga que se agrega al níquel 2% de ThO_2 en peso. La densidad del ThO_2 es de 9.69 g/cm^3. Cada partícula de ThO_2 tiene un diámetro de 1000 Å. ¿Cuántas partículas están presentes en cada centímetro cúbico?

SOLUCIÓN

Suponga que 100 g del material contienen 2 g de ThO_2 y 98 g de Ni. La densidad del níquel es de 8.9 g/cm^3. La fracción volumétrica de ThO_2 es

$$f_{ThO_2} = \frac{\dfrac{2\text{ g}}{9.69\text{ g/cm}^3}}{\dfrac{2\text{ g}}{9.69\text{ g/cm}^3} + \dfrac{98\text{ g}}{8.90\text{ g/cm}^3}} = 0.0184$$

Por lo tanto, hay 0.0184 cm^3 de ThO_2 por centímetro cúbico de material compuesto. El volumen de cada esfera de ThO_2 es

$$V_{ThO_2} = \tfrac{4}{3}\pi r^3 = \tfrac{4}{3}\pi(5 \times 10^{-6}\text{ cm})^3 = 5.24 \times 10^{-16}\text{ cm}^3$$

$$\text{La concentración de partículas de } ThO_2 \text{ es } = \frac{0.0184}{5.24 \times 10^{-16}} = 3.51 \times 10^{13} \text{ de partículas/cm}^3$$

17-2 Compuestos particulados

Los compuestos particulados están diseñados para producir combinaciones poco comunes y no para mejorar la resistencia. Los compuestos particulados contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no bloquean de manera eficiente la mezcla refractaria.

Regla de las mezclas

Ciertas propiedades del compuesto particulado dependen sólo de cantidades relativas y propiedades de los constituyentes individuales. La **regla de las mezclas** puede predecir con exactitud estas reglas. Por ejemplo, la densidad de un compuesto particulado es

$$\rho_c = \sum(f_i\rho_i) = f_1\rho_1 + f_2\rho_2 + \cdots + f_n\rho_n \qquad (17\text{-}1)$$

donde ρ_c es la densidad del compuesto, ρ_1, ρ_2, …, ρ_h son las densidades de cada constituyente en el compuesto, y $f_1, f_2, \ldots, f_h$ son las fracciones volumétricas de cada constituyente. Observe que para muchas propiedades también es muy importante la conectividad de diferentes fases (es decir, la forma en que la fase dispersa está dispuesta con respecto a la fase continua).

Carburos cementados

Los carburos cementados, o cermets, contienen partículas cerámicas duras dispersas en una matriz metálica. Los insertos de carburo de tungsteno que se usan para herramientas de corte en operaciones de maquinado son comunes de este grupo. El carburo de tungsteno (WC) es un material cerámico duro, rígido y con una alta temperatura de fusión. Para mejorar la tenacidad, las partículas de carburo de tungsteno se combinan con polvo de cobalto y se comprimen en preformas de polvo compactado. Estas preformas se calientan a temperaturas por arriba de la fusión del cobalto. El cobalto líquido envuelve cada una de las partículas sólidas del tungsteno (figura 17-4). Después de la solidificación, el cobalto sirve como aglutinante para el carburo de tungsteno y se obtiene una buena resistencia al impacto. Otros carburos, como el TaC y el TiC, también pueden incluirse en los cermets. El siguiente ejemplo ilustra el cálculo de la densidad para el carburo cementado.

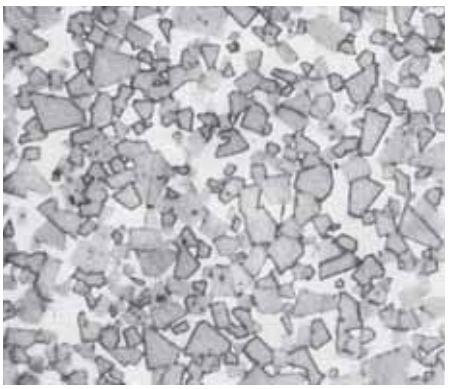


Figura 17-4 Microestructura del carburo de tungsteno, con 20% de carburo de cobalto cementado (1300 ×). [*Fuente:* ASM Handbook, *vol. 7 (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org.*]

Ejemplo 17-2 *Carburos cementados*

Una herramienta de corte de carburo cementado que se usa en una operación de maquinado contiene 75%p de WC, 15%p de TiC, 5%p de TaC y 5% en peso de Co. Estime la densidad del compuesto.

SOLUCIÓN

Primero debe convertir los porcentajes en peso a fracciones volumétricas. Las densidades de los componentes del compuesto son:

$$\rho_{WC} = 15.77 \text{ g/cm}^3 \qquad \rho_{TiC} = 4.94 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{TaC} = 14.5 \text{ g/cm}^3 \qquad \rho_{Co} = 8.83 \text{ g/cm}^3$$

$$f_{WC} = \frac{75/15.77}{75/15.77 + 15/4.94 + 5/14.5 + 5/8.83} = \frac{4.76}{8.70} = 0.546$$

$$f_{TiC} = \frac{15/4.94}{8.70} = 0.349$$

$$f_{TaC} = \frac{5/14.5}{8.70} = 0.040$$

$$f_{Co} = \frac{5/8.83}{8.70} = 0.065$$

Según la regla de las mezclas, la densidad del compuesto es

$$\rho_c = \sum (f_i \rho_i) = (0.546)(15.77) + (0.349)(4.94) + (0.040)(14.5) + (0.065)(8.83)$$
$$= 11.5 \text{ g/cm}^3$$

Abrasivos Los discos para rectificado y corte se elaboran a partir de la alúmina (Al_2O_3), del carburo de silicio (SiC) y del nitruro de boro cúbico (CBN). Para obtener tenacidad, las partículas abrasivas se unen mediante una matriz vítrea o polimérica. Los abrasivos de diamante por lo general se unen en una matriz metálica. Conforme se desgastan las partículas duras, éstas se fracturan o desprenden de la matriz, y ponen al descubierto nuevas superficies de corte.

Contactos eléctricos Los materiales que se usan en contactos eléctricos de interruptores y relevadores deben tener una buena combinación de resistencia al desgaste y conductividad eléctrica; de otra manera, los contactos se erosionan y provocan mal enlace y arco eléctrico. La plata reforzada con tungsteno proporciona esta combinación de características. Para obtener una alta porosidad interconectada, se prepara un polvo de tungsteno compactado mediante procesos convencionales de metalurgia de polvos (figura 17-5). Después se infiltra plata líquida mediante un vacío, a fin de llenar los huecos interconectados. Tanto la plata como el tungsteno son continuos. De esta manera, la plata pura conduce la corriente con eficiencia, al tiempo que el tungsteno duro aporta resistencia al desgaste.

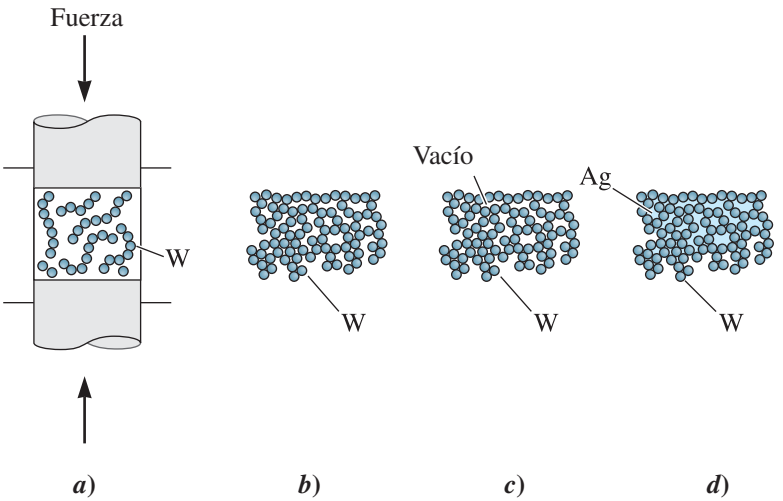


Figura 17-5 Pasos para la producción de un compuesto eléctrico de plata-tungsteno: *a*) se comprimen los polvos de tungsteno, *b*) se obtiene un producto de baja densidad, *c*) el sinterizado une los polvos de tungsteno, y *d*) se infiltra plata líquida en los poros entre partículas.

Ejemplo 17-3 *Material compuesto de plata-tungsteno*

Para fabricar contactos eléctricos se elabora un compuesto de plata-tungsteno, para lo cual primero se elabora compacto de tungsteno poroso por metalurgia de polvos, y después se infiltra plata pura en los poros. La densidad del compacto de tungsteno antes de la infiltración es de 14.5 g/cm^3. Calcule la fracción volumétrica de la porosidad y el porcentaje en peso final de plata en el compacto después de la infiltración.

SOLUCIÓN

Las densidades del tungsteno puro f_w y de la plata pura f_{Ag} son de 19.25 g/cm^3 y 10.49 g/cm^3, respectivamente. Se puede suponer que la densidad de un poro es igual a cero, por lo que, con base en la regla de las mezclas:

$$\rho_c = f_W\rho_W + f_{poro}\rho_{poro}$$

$$14.5 \text{ g/cm}^3 = f_W(19.25 \text{ g/cm}^3) + f_{poro}(0)$$

$$f_W = 0.75$$

$$f_{poro} = 1 - 0.75 = 0.25$$

Después de la infiltración, la fracción volumétrica de la plata es igual a la fracción volumétrica de los poros:

$$f_{Ag} = f_{poro} = 0.25$$

En 1 cm^3 de material:

$$\text{Ag\% pe} = \frac{(0.25 \text{ cm}^3)(10.49 \text{ g/cm}^3)}{(0.25 \text{ cm}^3)(10.49 \text{ g/cm}^3) + (0.75 \text{ cm}^3)(19.25 \text{ g/cm}^3)} \times 100 = 15\% \text{ en peso de}$$

Esta solución supone que todos los poros están abiertos o interconectados.

Polímeros Numerosos polímeros ingenieriles, que contienen rellenos y extensores, son compuestos particulados. Un ejemplo clásico es el negro de carbón en el caucho vulcanizado. El negro de carbón está formado por minúsculos esferoides de carbón de sólo 5 a 500 nm de diámetro. El negro de carbono mejora la resistencia, la rigidez, la dureza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la degradación debida a los rayos ultravioleta, así como la resistencia del caucho a la temperatura. A los neumáticos de caucho se le agregan nanopartículas de sílice para incrementar su rigidez.

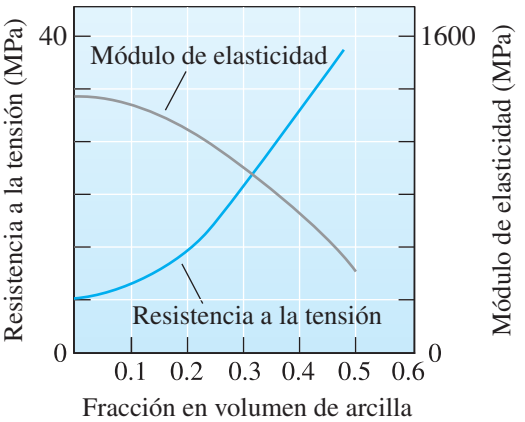


Figura 17-6 Efecto de la arcilla sobre las propiedades del polietileno.

Con el propósito de lograr que se requiera menor cantidad del polímero, que es más caro, se agregan extensores como carbonato de calcio ($CaCO_3$), esferas sólidas de vidrio y diversas arcillas. Es posible que los extensores hagan más rígido al polímero, incrementen la dureza y la resistencia al desgaste, aumenten la conductividad térmica, o bien, mejoren la resistencia a la termofluencia, aun cuando por lo general se reducen la resistencia y la ductilidad (figura 17-6). Si se agregan esferas de vidrio huecas, se puede conseguir el mismo cambio en las propiedades y al mismo tiempo reducir de forma significativa el peso del compuesto. Se pueden obtener otras propiedades especiales. Las partículas de elastómero se introducen en polímeros para mejorar la tenacidad de éstos. El polietileno puede ser cargado con polvos metálicos, como el plomo, para mejorar la absorción de productos de la fisión en aplicaciones nucleares. En el siguiente ejemplo se ilustra el diseño de un compuesto polimérico.

Ejemplo 17-4 *Diseño de un material compuesto polimérico particulado*

Diseñe un compuesto de polietileno relleno de arcilla, adecuado para el moldeo por inyección de compuestos de bajo costo. La pieza final debe tener una resistencia a la tensión de por lo menos 21 MPa y un módulo de elasticidad no menor de 552 MPa. El costo del polietileno es de aproximadamente 1.1 dólares por kilogramo, el de la arcilla aproximadamente de 10 centavos de dólar por kilogramo. La densidad del polietileno es de 0.95 g/cm^3 y la de la arcilla es de 2.4 g/cm^3.

SOLUCIÓN

Como se muestra en la figura 17-6, se requiere una fracción volumétrica de arcilla por debajo de 0.35 para mantener una resistencia a la tensión superior a los 21 MPa, en tanto que se necesita una fracción volumétrica de por lo menos 0.2 para obtener el módulo de elasticidad mínimo. Para reducir el costo al mínimo se usa toda la arcilla permisible, es decir, una fracción volumétrica de 0.35.

En 1000 cm^3 de partes de compuesto existen 350 cm^3 de arcilla y 650 cm^3 de polietileno, es decir,

$$(350\ \text{cm}^3)(2.4\ \text{g/cm}^3) = 840\ \text{g de arcilla}$$

$$(650\ \text{cm}^3)(0.95\ \text{g/cm}^3) = 617.50\ \text{g de polietileno}$$

El costo de los materiales es

$$(840\ \text{g arcilla})(\$0.1/\text{kg}) = \$0.084$$

$$(617.50\ \text{g PE})(\$1.1/\text{kg}) = \$0.68$$

$$\text{Total} = \$0.764\ \text{por}\ 1000\ \text{cm}^3$$

Suponga que el peso es un factor determinante. La densidad del compuesto es

$$\rho_c = (0.35)(2.4\ \text{g/cm}^3) + (0.65)(0.95\ \text{g/cm}^3) = 1.46\ \text{g/ cm}^3$$

Quizá sea conveniente sacrificar parte del ahorro a fin de obtener un menor peso. Si se usa sólo una fracción volumétrica de 0.2 de arcilla, entonces (utilizando el mismo método señalado) se encuentra que se necesitan 480 g de arcilla y 760 g de polietileno.

Ahora el costo de los materiales es

$$\begin{aligned}(480\text{ g de arcilla})(\$0.1/\text{kg}) &= \$0.048\\ (760\text{ g de PE})(\$1.1/\text{kg}) &= \$0.836\\ \text{Total} &= \$0.88 \text{ por } 1000\text{ cm}^3\end{aligned}$$

La densidad del compuesto es

$$\rho_c = (0.2)(2.4\text{ g/cm}^3) + (0.8)(0.95\text{ g/cm}^3) = 1.24\text{ g/cm}^3$$

Los materiales cuestan ahora aproximadamente 15% más, pero se obtiene una reducción en peso de 15%.

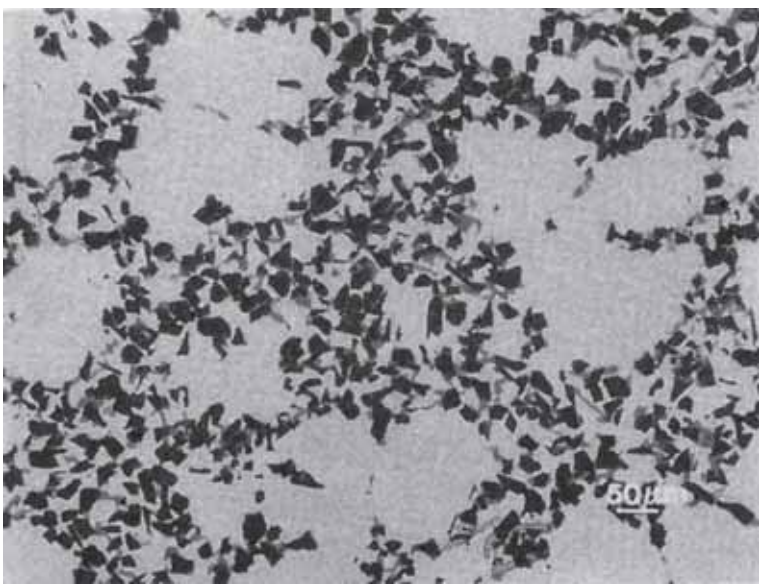


Figura 17-7 Aleación de una pieza fundida de aluminio reforzada con un volumen de 20% de partículas de carburo con silicio. (*DAS, S. K. et al*. High performance composites for the 1990's: Proceedings of a TMS Northeast *Regional Symposium patrocinado por TMS-New Jersey Chapter en Morristown, Nueva Jersey, 6 al 8 de junio de 1990. Derechos reservados 1991. The Minerals, Metals & Materials Society. Reimpreso con autorización.*)

Compuestos particulados de metales fundidos Las fundiciones de aluminio con partículas de SiC para aplicaciones automotrices, que incluyen pistones y bielas, representan una aplicación comercial importante para compuestos particulados (figura 17-7). Mediante un proceso especial, las partículas de SiC pueden ser humedecidas por el líquido, lo cual ayuda a evitar que las partículas cerámicas se hundan durante la solidificación.

17-3 Compuestos reforzados con fibras

La mayoría de los compuestos reforzados con fibras muestran mayor resistencia a la fatiga, mejor módulo de Young y una mejor relación entre resistencia y peso al incorporar fibras resistentes, rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, que soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La matriz también proporciona protección para la superficie con fibras y reduce al mínimo la difusión de especies como el oxígeno o la

humedad que pueden degradar las propiedades mecánicas de las fibras. La resistencia del compuesto puede resultar alta tanto a temperatura ambiente como a temperaturas altas (figura 17-2).

Se utilizan muchos tipos de materiales de refuerzo. Durante siglos se usó paja para reforzar los ladrillos de barro. En las estructuras de concreto se introducen como refuerzo varillas de acero. Las fibras de vidrio en una matriz polimérica producen fibra de vidrio para aplicaciones en transportes y naves aeroespaciales. Fibras hechas de boro, carbono, polímeros (por ejemplo, aramidas, capítulo 16) y materiales cerámicos proporcionan un refuerzo excepcional en los compuestos avanzados, basados en matrices de polímeros, metales, materiales cerámicos e incluso compuestos intermetálicos.

La regla de las mezclas en compuestos reforzados con fibra

Igual que en el caso de los compuestos particulados, la regla de las mezclas dará siempre la densidad de compuestos reforzados con fibra:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f \tag{17-2}$$

donde los subíndices m y f se refieren a la matriz y a las fibras. Observe que $f_m = 1 - f_f$.

Además, la regla de las mezclas predice con exactitud las conductividades térmica y eléctrica de los compuestos reforzados con fibras a lo largo de la dirección de las mismas, si éstas son *continuas* y *unidireccionales*:

$$k_c = f_m k_m + f_f k_f \tag{17-3}$$

$$\sigma_c = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f \tag{17-4}$$

donde k es la conductividad térmica y σ la conductividad eléctrica. La energía térmica o la eléctrica se puede transferir por todo el volumen del compuesto con una rapidez proporcional a la fracción volumétrica del material conductor. En un compuesto con una matriz de metal y fibras cerámicas, el grueso de la energía pasaría a través de la matriz; en un compuesto formado por una matriz polimérica que contenga fibras metálicas, la energía sería transferida a través de las fibras.

Cuando las fibras no son continuas o unidireccionales, es posible que no sea aplicable la simple regla de las mezclas. Por ejemplo, en un compuesto de matriz polimérica con fibras metálicas, la conductividad eléctrica sería baja y dependería de la longitud de las fibras, de la fracción volumétrica de éstas y con qué frecuencia se tocan las fibras entre sí. Lo anterior se expresa por medio del concepto de conectividad de las fases.

Módulo de elasticidad

Para determinar el módulo de elasticidad se utiliza la regla de las mezclas, siempre que las fibras sean continuas y unidireccionales. Paralelo a las fibras, el módulo de elasticidad puede alcanzar valores de hasta

$$E_{c,\parallel} = f_m E_m + f_f E_f \tag{17-5}$$

Cuando el esfuerzo aplicado es muy alto, la matriz comienza a deformarse y la curva esfuerzo-deformación deja de ser lineal (figura 17-8). Dado que ahora la matriz sólo contribuye un poco a la rigidez del compuesto, el módulo se puede estimar de manera aproximada por

$$E_{c,\parallel} = f_f E_f \tag{17-6}$$

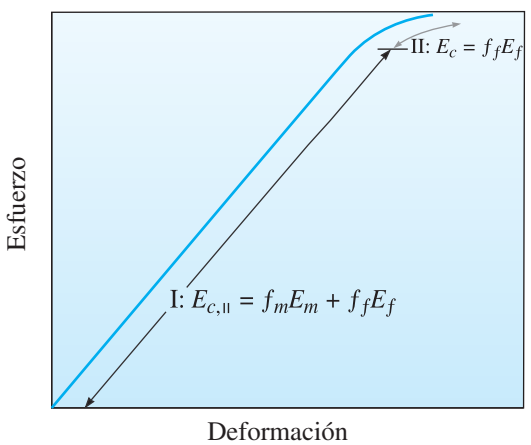


Figura 17-8 Curva esfuerzo-deformación de un compuesto reforzado con fibras. En esfuerzos reducidos (región I), el módulo de elasticidad se obtiene mediante la regla de las mezclas. En esfuerzos más altos (región II), la matriz se deforma y la curva ya no sigue la regla de las mezclas.

Cuando la carga se aplica de forma perpendicular a las fibras, cada uno de los componentes del compuesto actuará de manera independiente del otro. Ahora el módulo de elasticidad del compuesto es

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \tag{17-7}$$

Los siguientes ejemplos ilustran estos conceptos.

Ejemplo 17-5 *Regla de las mezclas para compuestos: esfuerzo paralelo a las fibras*

Deduzca la regla de las mezclas (ecuación 17-5) para el módulo de elasticidad de un compuesto reforzado con fibras cuando se le aplica un esfuerzo (σ) a lo largo del eje de las fibras.

SOLUCIÓN

La fuerza total que actúa sobre el compuesto es la suma de las fuerzas que soportan cada uno de los constituyentes:

$$F_c = F_m + F_f$$

Dado que $F = \sigma A$, el área intereseccional es

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f$$

$$\sigma_c = \sigma_m\left(\frac{A_m}{A_c}\right) + \sigma_f\left(\frac{A_f}{A_c}\right)$$

Si las fibras tienen una sección transversal uniforme, la fracción de área es igual a la fracción volumétrica f:

$$\sigma_c = \sigma_m f_m + \sigma_f f_f$$

De la ley de Hooke, $\sigma = E\varepsilon$. Por lo tanto,

$$E_{c,\parallel}\,\varepsilon_c = E_m \varepsilon_m f_m + E_f \varepsilon_f f_f$$

Si las fibras están unidas rígidamente a la matriz, tanto las fibras como la matriz deberán estirarse cantidades iguales (condiciones de isodeformación):

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

$$E_{c,\parallel} = f_m E_m + f_f E_f$$

Ejemplo 17-6 *Módulo de elasticidad para los compuestos: esfuerzo perpendicular a las fibras*

Deduzca la ecuación del módulo de elasticidad de un compuesto reforzado con fibras al aplicársele un esfuerzo en dirección perpendicular al eje de las fibras (ecuación 17-7).

SOLUCIÓN

En este ejemplo, las deformaciones ya no son iguales; en cambio, la suma ponderada de las deformaciones de cada uno de los componentes es igual a la deformación total del compuesto, en tanto que en cada componente los esfuerzos son iguales (condición de isoesfuerzo):

$$\varepsilon_c = f_m \varepsilon_m + f_f \varepsilon_f$$

$$\frac{\sigma_c}{E_{c,\perp}} = f_m\left(\frac{\sigma_m}{E_m}\right) + f_f\left(\frac{\sigma_f}{E_f}\right)$$

Como $\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$,

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f}$$

Ejemplo 17-7 *Materiales compuestos de aluminio y boro*

El boro recubierto con aluminio reforzado SiC (o Borsic) con 40% en volumen de fibras es un compuesto importante, ligero y de alta temperatura. Estime la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión paralelos al eje de las fibras. También estime el módulo de elasticidad perpendicular a las fibras.

SOLUCIÓN

Las propiedades de cada uno de los componentes aparecen a continuación.

Material	Densidad ρ (g/cm^3)	Módulo de elasticidad *E* (MPa)	Resistencia a la tensión *TS* (MPa)
Fibras	2.36	379×10^3	2760
Aluminio	2.70	69×10^3	35

De la regla de las mezclas:

$$\rho_c = (0.6)(2.70\ \text{g/cm}^3)+(0.4)(2.36\ \text{g/cm}^3) = 2.56\ \text{g/cm}^3$$
$$E_{c,\parallel} = (0.6)(69 \times 10^3)+(0.4)(379 \times 10^3) = 193 \times 10^3\ \text{MPa}$$
$$TS_c = (0.6)(35\ \text{MPa}) + (0.4)(2760\ \text{MPa}) = 1125\ \text{MPa}$$

Observe que el cálculo de la resistencia a la tensión es sólo una aproximación. Perpendicular a las fibras:

$$\frac{1}{E_{c,\perp}} = \frac{0.6}{69 \times 10^3} + \frac{0.4}{379 \times 10^3} = 0.00976 \times 10^{-3}$$
$$E_{c,\perp} = 102.5 \times 10^3\ \text{MPa}$$

En la figura 17-9 se ilustra el módulo real y la resistencia paralela a las fibras. El módulo de elasticidad calculado (193×10^3 MPa) es exactamente el mismo que el módulo medido. La resistencia estimada (1125 MPa) es considerablemente superior a la real (alrededor de 896 MPa). Se observa también que el módulo de elasticidad es bastante anisotrópico, con el módulo perpendicular a las fibras igual a sólo la mitad del módulo paralelo a las mismas.

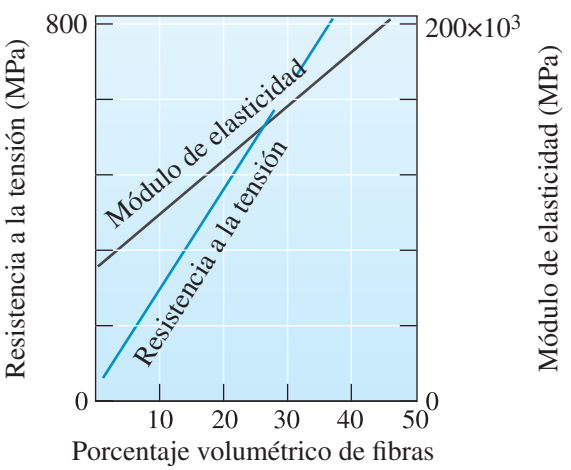


Figura 17-9 Influencia del porcentaje volumétrico de fibras de boro recubiertas de SiC (Borsic), sobre las propiedades del aluminio reforzado con Borsic, en la dirección paralela a las fibras (para el ejemplo 17-7).

Ejemplo 17-8 ***Materiales compuestos de nylon con fibras de vidrio***

Las fibras de vidrio en el nylon proporcionan refuerzo. Si el nylon contiene 30% volumétrico de vidrio E, ¿qué fracción de la fuerza aplicada soportan las fibras de vidrio?

SOLUCIÓN

El módulo de elasticidad de cada uno de los componentes del compuesto es

$$E_{\text{vidrio}} = 72.4 \times 10^3 \text{ MPa} \qquad E_{\text{nylon}} = 2.8 \times 103 \text{ MPa}$$

Si la unión es buena, tanto el nylon como las fibras de vidrio estarán sujetos a un esfuerzo igual; por lo tanto,

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$$

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{E_f}{E_m} = \frac{72.4 \times 10^3 \text{ MPa}}{2.8 \times 10^3} = 25.86$$

Así, la fracción de la fuerza soportada por las fibras está dada por

$$\text{Fracción} = \frac{F_f}{F_f + F_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_f A_f + \sigma_m A_m} = \frac{\sigma_f(0.3)}{\sigma_f(0.3) + \sigma_m(0.7)}$$

$$= \frac{0.3}{0.3 + 0.7(\sigma_m/\sigma_f)} = \frac{0.3}{0.3 + 0.7(1/25.86)} = 0.92$$

donde F_f es la fuerza soportada por las fibras y F_m la fuerza soportada por la matriz.

Casi toda la carga es soportada por las fibras de vidrio.

17-4 Características de compuestos reforzados con fibras

Al diseñar un compuesto reforzado con fibras deben considerarse numerosos factores, que incluyen longitud, diámetro, orientación, cantidad y propiedades de las fibras, así como las propiedades de la matriz y de la unión entre las fibras y la matriz.

Longitud y diámetro de las fibras

Las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas. A menudo, sus dimensiones se caracterizan en función de la **proporción dimensional** l/d, donde l es la longitud de la fibra y d es su diámetro. Las fibras comunes tienen diámetros que varían desde 10 μm (10×10^{-4} cm) hasta 150 μm (150×10^{-4} cm).

La resistencia del compuesto se mejora cuando la proporción dimensional es grande. Con frecuencia, las fibras se fracturan debido a defectos superficiales. Al hacer que los diámetros sean tan pequeños como sea posible, las fibras tienen menos área superficial y, en consecuencia, menos defectos que pudieran propagarse durante el proceso o bajo carga. También se prefieren las fibras largas. Los extremos de una fibra soportan menos carga que el resto; en consecuencia, mientras menos extremos existan, mayor será la capacidad de absorción de carga de las fibras (figura 17-10).

En muchos sistemas reforzados con fibra se utilizan fibras discontinuas, con una proporción dimensional superior al de cierto valor crítico, para llegar a un término medio aceptable entre

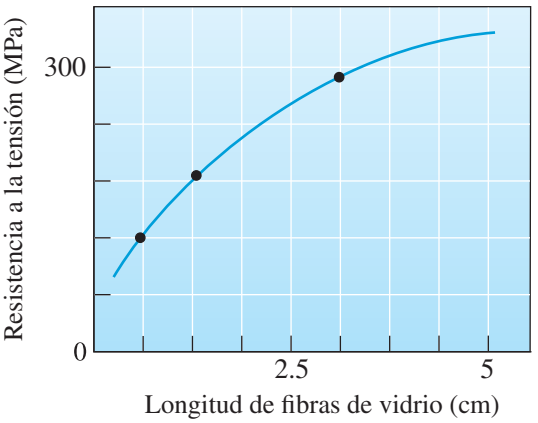


Figura 17-10 Si se incrementa la longitud de las fibras de vidrio E cortadas existentes en una matriz de resina epóxica, se incrementa la resistencia del compuesto. En este ejemplo la fracción volumétrica de fibras de vidrio es aproximadamente 0.5.

facilidad de proceso y propiedades. Se puede llegar a determinar una longitud crítica de la fibra l_c para cualquier diámetro determinado de fibra d:

$$l_c = \frac{TS_f d}{2\tau_i} \tag{17-8}$$

donde TS_f es la resistencia de la fibra a la tensión, y τ_i está relacionada con la resistencia de la unión entre la fibra y la matriz, o con el esfuerzo en el que la matriz comienza a deformarse. Si la longitud de la fibra l es inferior a l_c, se observará poco efecto de refuerzo; si l es mayor que aproximadamente $15l_c$, la fibra se comportará casi como si fuera continua. La resistencia de compuesto se puede estimar a partir de

$$\sigma_c = f_f TS_f\left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + f_m\sigma_m \tag{17-9}$$

donde σ_m es el esfuerzo que se ejerce sobre la matriz cuando las fibras se rompen.

Cantidad de fibras

Una fracción volumétrica mayor de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto, como se podría esperar a partir de la regla de las mezclas. La fracción volumétrica máxima es de aproximadamente 80%, más allá de la cual las fibras ya no pueden estar totalmente recubiertas o rodeadas por la matriz.

Orientación de fibras

Las fibras de refuerzo pueden introducirse en la matriz con diversas orientaciones. Las fibras cortas de orientación aleatoria y con una pequeña proporción dimensional, como es el caso de las fibras de vidrio, son fáciles de introducir en la matriz y le dan al compuesto un comportamiento relativamente isotrópico.

Las configuraciones de fibras largas, o incluso continuas y unidireccionales, producen propiedades anisotrópicas, con una resistencia y rigidez particularmente buenas en dirección paralela a las fibras. Estas fibras se conocen como capas a 0°, lo cual muestra que todas las fibras están alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado. Sin embargo, las orientaciones unidireccionales originan malas propiedades si la carga es perpendicular a dichas fibras (figura 17-11).

Una de las características únicas de los compuestos reforzados con fibra es que pueden adaptar sus propiedades para cubrir diferentes tipos de condiciones de carga. Se pueden introducir, en varias direcciones dentro de la matriz, fibras largas y continuas (figura 17-12); en configuraciones ortogonales (capas 0°/90°) se pueden obtener buenas resistencias en dos direcciones perpendiculares. Las configuraciones más complejas (como capas 0°/±45°/90°) proporcionan refuerzo en múltiples direcciones.

Las fibras también pueden ordenarse en patrones tridimensionales. Incluso en el más simple de los tejidos, las fibras de cada capa individual de tela tienen un pequeño grado de orientación en una tercera dirección. Cuando las capas de tela están tejidas o cocidas unas con otras, se obtiene un esfuerzo tridimensional mayor. También se pueden usar tejidos tridimensionales más complejos (figura 17-13).

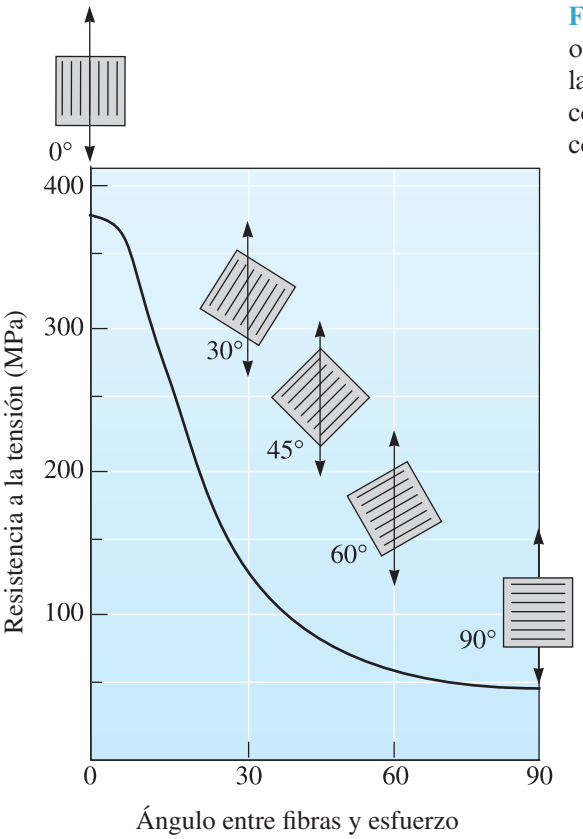


Figura 17-11 Efecto de la orientación de la fibra sobre la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E.

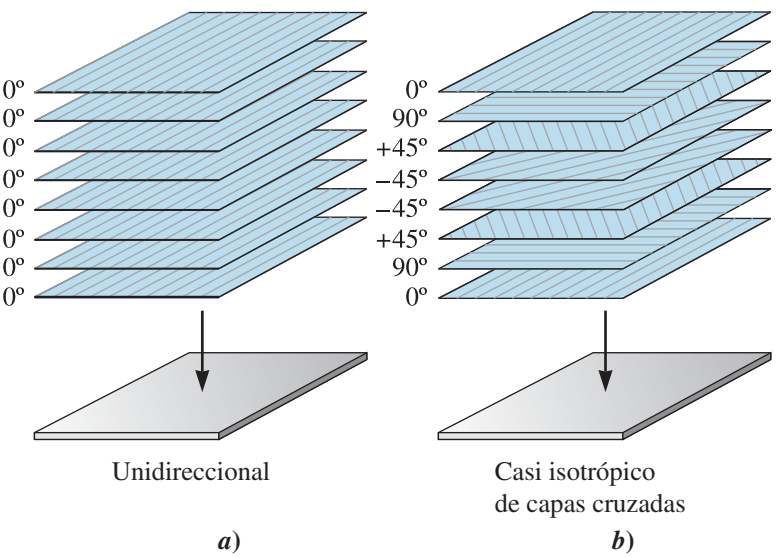


Figura 17-12 *a*) Se pueden unir cintas con fibras alineadas para producir una estructura compuesta unidireccional de varias capas. *b*) Se pueden unir cintas con fibras alineadas en varias orientaciones para producir un compuesto casi isotrópico. En este caso se ha formado un compuesto 0°/±45°/90°.

Propiedades de las fibras

En la mayoría de los materiales compuestos reforzados con fibras, las fibras son resistentes, rígidas y ligeras. Por lo tanto, la resistencia y el módulo específicos de la fibra son características importantes:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{TS}{\rho} \tag{17-10}$$

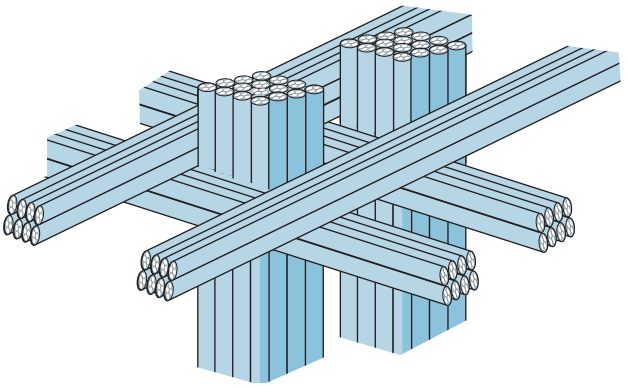


Figura 17-13 Tejido tridimensional para compuestos reforzados con fibra.

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho} \tag{17-11}$$

donde TS es la resistencia a la tensión, ρ la densidad y E el módulo de elasticidad. Si el compuesto se usará a temperaturas altas, la fibra también debe tener una temperatura de fusión alta.

Las propiedades de fibras comunes aparecen en la tabla 17-2 y la figura 17-14. Observe que en la tabla 17-2 las unidades de densidad son g/cm^3. También observe que $1\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0.0361\ \text{lb}\frac{\text{g}}{\text{plg}^3}$. Por lo general, el módulo específico más alto se presenta en materiales de bajo número atómico y enlaces covalentes, como en el caso del carbono y del boro. Estos dos elementos también tienen alta resistencia y una alta temperatura de fusión.

Tabla 17-2 Propiedades de materiales de refuerzo seleccionados*

Material	Densidad ρ (g/cm^3)	Resistencia a la tensión TS (MPa)	Módulo de elasticidad E ($\times 10^3$ MPa)	Temperatura de fusión (°C)	Módulo específico ($\times 10^7$ cm)	Resistencia específica ($\times 10^6$ cm)
Polímeros:						
Kevlar[MR]	1.44	4480	124	500	86.8	31.3
Nylon	1.14	83	3.5	249	2.5	7.3
Polietileno	0.97	3310	172	147	17.8	34.3
Metales:						
Be	1.85	1280	287	1290	165	7.0
Boro	2.36	3450	379	2076	161.8	11.8
W	19.25	4000	407	3410	21.3	2.0
Vidrio:						
Vidrio W	2.55	3450	72.4	<1725	28.5	14.0
Vidrio S	2.50	4480	86.9	<1725	35.0	18.0
Carbono:						
HS (alta resistencia)	1.75	5650	276	3700	158.8	32.5
HM (alto módulo)	1.90	1860	531	3700	280.0	9.8
Materiales cerámicos:						
Al_2O_3	3.95	2070	379	2015	97.0	5.3
B_4C	2.36	2280	483	2450	206.0	9.8
SiC	3.00	3930	483	2700	118.3	13.3
ZrO_2	4.84	2070	345	2677	71.5	4.3
Bigotes:						
Al_2O_3	3.96	20700	428	1982	108.5	52.5
Cr	7.20	8900	241	1890	33.5	12.3
Grafito	1.66	20700	703	3700	425.0	125.5
SiC	3.18	20700	483	2700	152.0	65.5
Si_3N_4	3.18	13800	379		119.5	43.8

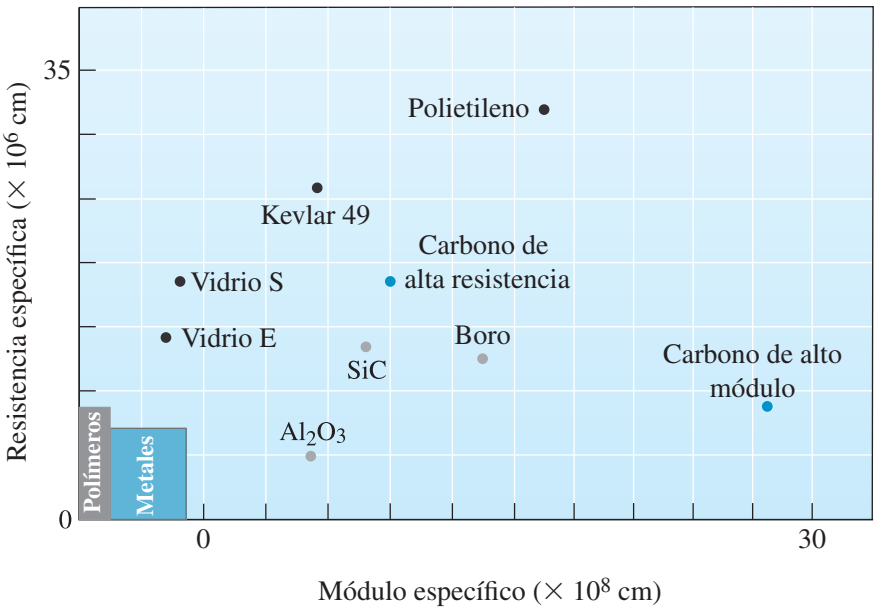


Figura 17-14 Resistencia y módulo específicos de las fibras, comparadas con las de los metales y polímeros.

Las **fibras de aramidas**, de las cuales el ejemplo más conocido es el Kevlar^{MR}, son polímeros poliamidas aromáticos endurecidos mediante una estructura con anillos de benceno (figura 17-15), y son ejemplos de polímeros cristalinos líquidos en los que las cadenas de polímeros tienen forma de varillas y son muy rígidas. También se dispone de fibras de polietileno especialmente preparadas. Tanto las fibras de aramidas como las de polietileno tienen excelente resistencia y rigidez, pero su uso está limitado a bajas temperaturas. Debido a su menor densidad, las fibras de polietileno ofrecen una resistencia específica y un módulo específico superiores.

Las fibras cerámicas y los bigotes (incluyendo la alúmina, el vidrio y el carburo de silicio) son resistentes y rígidas. Las fibras de vidrio, que son las de uso más común, incluyen a la sílice pura, el vidrio S (25% de Al_2O_3, 10% de MgO y el resto es SiO_2) y el vidrio E (18% de CaO, 15% de Al_2O_3 y el resto es SiO_2). Aun cuando son considerablemente más densas que las fibras poliméricas, las fibras cerámicas se pueden usar a temperaturas mucho más altas. El berilio y el tungsteno, a pesar de que poseen enlaces metálicos, tienen un alto módulo que los hace atractivos para ciertas aplicaciones en materiales para fibras. El siguiente ejemplo analiza problemas relacionados con el diseño con materiales compuestos.

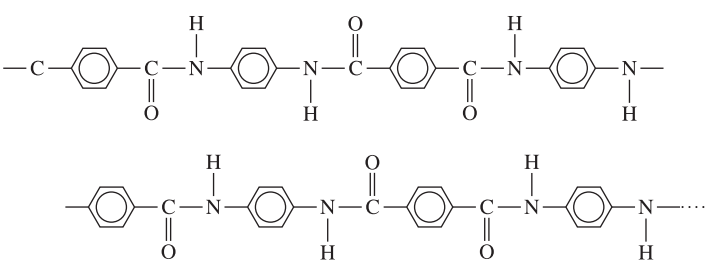


Figura 17-15 Estructura del Kevlar^{MR}. Las fibras están unidas mediante enlaces secundarios entre los átomos de oxígeno e hidrógeno de cadenas adyacentes.

Ejemplo 17-9 *Diseño de un material compuesto aeroespacial*

En la actualidad se usa una selección de aluminio 7075-T6 (con módulo de elasticidad de 69×10^3 MPa) para fabricar un panel de 227 kg para una aeronave comercial. La experiencia ha demostrado que cada reducción de una libra en el peso de la aeronave disminuye el consumo de combustible 4200 litros al año. Diseñe un material para este panel que reduzca el peso, y aun así mantenga el mismo módulo específico y sea económico en los 10 años de vida útil de la aeronave.

SOLUCIÓN

Existen muchos materiales que podrían usarse para ahorrar peso. Como ejemplo, vea una aleación Al-Li reforzada con fibras de boro en condición T6. Tanto la fibra de boro como la adición de la aleación de litio incrementan el módulo de elasticidad; el boro y la aleación Al-Li también tienen densidades inferiores a las de las aleaciones comunes de aluminio.

El módulo específico de la aleación actual 7075-T6 es

$$\text{Módulo específico} = \frac{(69 \times 10^3 \text{ MPa})}{\left(2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}$$

$$= 2.61 \times 10^8 \text{cm}$$

La densidad de las fibras de boro es de aproximadamente 2.36 g/cm^3 y la de una aleación común Al-Li es de unos 2.5 g/cm^3. Si se usan fibras de boro en una fracción volumétrica de 0.6 dentro del compuesto, entonces la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo específico de este compuesto son

$$\rho_c = (0.6)(2.36) + (0.4)(2.5) = 2.416 \text{ g/cm}^3$$

$$E_{c,\parallel} = (0.6)(379 \times 10^3 \text{ MPa}) + (0.4)(76 \times 10^3 \text{ MPa}) = 258 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{37 \times 10^6 \text{ psi}}{0.087 \text{ lb/in.}^3} = 4.3 \times 10^8 \text{ in.}$$

Si el módulo específico fuera el único factor que influyera en el diseño del componente, el espesor de la pieza podría reducirse 75% y su peso sería de 56.8 kg en lugar de 227 kg. El ahorro en peso sería entonces de 170.2 kg, o (4200 litros/kg) (170.2 kg) = 714,840 litros por año. Con un costo aproximado de $0.50 por litro se podría alcanzar un ahorro anual de $357,000 en combustible, es decir, $3.57 millones durante los 10 años de vida de la aeronave.

Esta es, obviamente, una comparación optimista, ya que otros factores, como la resistencia o factores de fabricación, podrían impedir que este componente se fabricara con un espesor tan pequeño como se sugiere. Además, el alto costo de las fibras de boro (superior a $660 por kilogramo), así como costos más altos de manufactura del compuesto en comparación con el aluminio 7075, reducirían este ahorro.

Propiedades de las matrices

La matriz soporta las fibras y las mantiene en su posición correcta, transfiere la carga a las fibras fuertes, protege las fibras contra daños durante su manufactura y uso en el compuesto, y evita la propagación de grietas en las fibras hacia todo el compuesto. Por lo general, la matriz aporta el control principal sobre las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas altas de un compuesto.

Las matrices poliméricas son particularmente comunes. La mayoría de los materiales poliméricos, tanto termoplásticos como termoestables, se fabrican en grados reforzados con fibras cortas

de vidrio. Estos compuestos se aprovechan en formas útiles mediante los procesos descritos en el capítulo 16. Los procesos de moldeo de láminas de compuestos (MLC) y los compuestos de moldeo en volumen (CMV) son característicos de este tipo de compuestos. Para aplicaciones a temperaturas un poco más altas, se usan poliimidas aromáticas termoestables.

Los compuestos de matriz metálica (CMM) incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones compuestas intermetálicas reforzadas con fibras cerámicas y metálicas. Mediante los compuestos de matriz metálica (CMM) se satisface una diversidad de aplicaciones aeroespaciales y automotrices. La matriz de metal permite que el compuesto funcione a altas temperaturas, pero a veces la producción del compuesto es más difícil y costosa que la producción de los materiales con matriz polimérica.

Los compuestos con matriz cerámica (CMC) tienen buenas propiedades a temperaturas altas, y son de menor peso que los compuestos de matriz metálica para alta temperatura. Más adelante se verá cómo incrementar la tenacidad en los CMC.

Unión y falla

Particularmente en los compuestos de matriz polimérica y metálica debe obtenerse una buena unión entre sus diversos constituyentes. Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz para que la carga se transmita de manera correcta de la matriz a las fibras. Además, si la unión es débil, las fibras pueden salirse de la matriz durante la carga, lo que reducirá la robustez y la resistencia a la fractura del compuesto. La figura 17-16 ilustra una unión defectuosa de las fibras de carbono en una matriz de cobre.

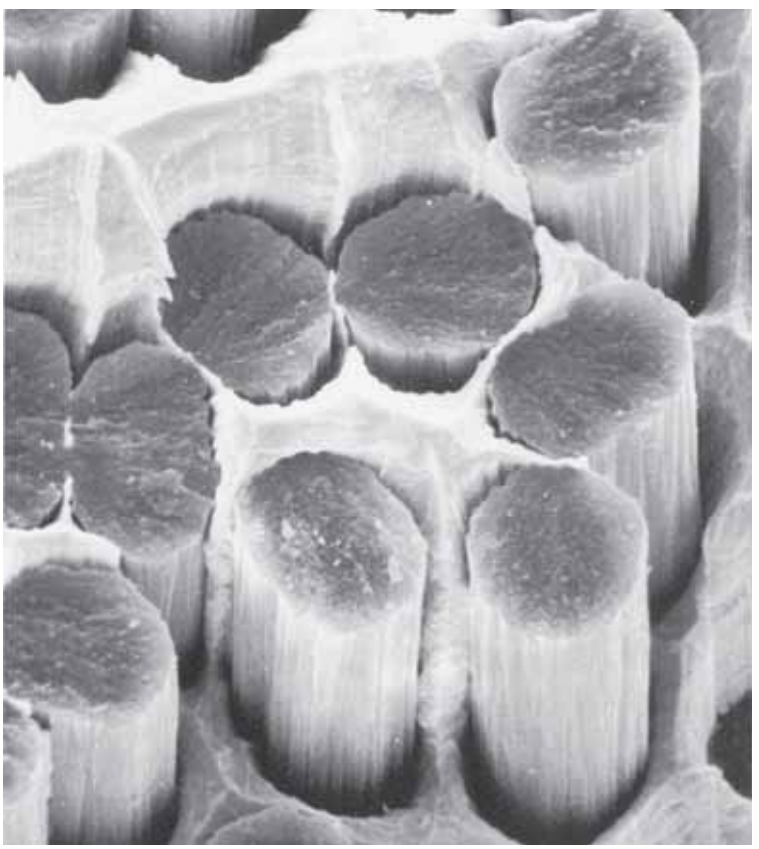


Figura 17-16 Micrografía electrónica de barrido de la superficie de fractura de una aleación de plata-cobre reforzada con fibras de carbono. Una mala unión es la causa de que gran parte de la superficie de fractura siga la interfase entre la matriz metálica y las fibras de carbono (3000 ×). *[Fuente: ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org]*

En algunos casos pueden usarse recubrimientos especiales para mejorar esta unión. Las fibras de vidrio se recubren con un acoplamiento o "anclado" de silano (llamado **agarre**), a fin de mejorar la unión y la resistencia a la humedad en los compuestos con fibras de vidrio. De igual manera, las fibras de carbono se recubren con un material orgánico para mejorar la unión. Se han recubierto fibras de boro con carburo de silicio o nitruro de boro para mejorar la unión con la matriz de aluminio; de hecho, estas fibras se conocen como fibras Borsic, para indicar la presencia del recubrimiento del carburo de silicio (SiC).

Otra propiedad que debe considerarse al combinar fibras dentro de una matriz es la similitud entre los coeficientes de expansión térmica de ambos materiales. Si la fibra se expande y contrae con una rapidez muy distinta de la matriz, las fibras pueden romperse o se puede desintegrar la unión, lo que provocaría una falla prematura.

En numerosos compuestos se unen capas o chapas individuales de tejido. La unión entre estas capas también debe ser buena, pues de lo contrario puede presentarse otro problema: la **delaminación**. Se ha sospechado que ésta es causante de algunos accidentes en aeronaves que han usado estructuras basadas en compuestos. Las capas se pueden separar bajo carga y provocar una falla. Para evitar la delaminación se utilizan compuestos que poseen tejido tridimensional.

17-5 Manufactura de fibras y compuestos

La producción de un compuesto reforzado con fibras implica varios pasos, entre los que se incluyen la producción de las fibras, la organización de éstas en paquetes o en tejidos, así como su introducción en la matriz.

Fabricación de las fibras

Las fibras metálicas, las de vidrio y muchas otras fibras poliméricas (entre las que se incluyen el nylon, la aramida y el poliacrilonitrilo) pueden elaborarse mediante procesos de estirado o trefilado, como se describió en el capítulo 8 (estirado de alambres de metal) y en el capítulo 16 (uso de un hilador de fibras de polímero).

El boro, el carbono y los materiales cerámicos son demasiado frágiles y reactivos para trabajarse utilizando procesos convencionales de estirado. La fibra de boro se produce por **deposición química de vapor** (DQV) [figura 17-17*a*)]. Como sustrato se usa un filamento muy fino de tungsteno caliente que pasa por un sello en una cámara caliente. En la cámara se introducen los compuestos de boro vaporizados como el BCl_3, los cuales se desintegran y permiten que el boro se precipite sobre el alambre de tungsteno [figura 17-18*a*)]. Las fibras de SiC se fabrican de manera similar, para lo cual se usan fibras de carbono como sustrato para el depósito de vapores de carburo de silicio [figura 17-18 *b*)].

Las fibras de carbono se elaboran mediante la **carbonización** o pirolización de un filamento orgánico, que se puede estirar o hilar más fácilmente en tramos largos, delgados y continuos [figura

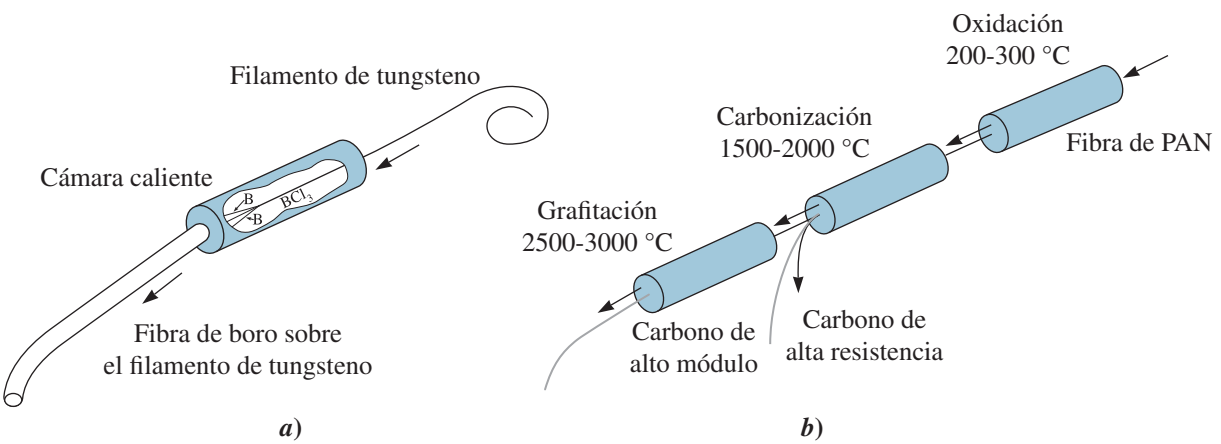
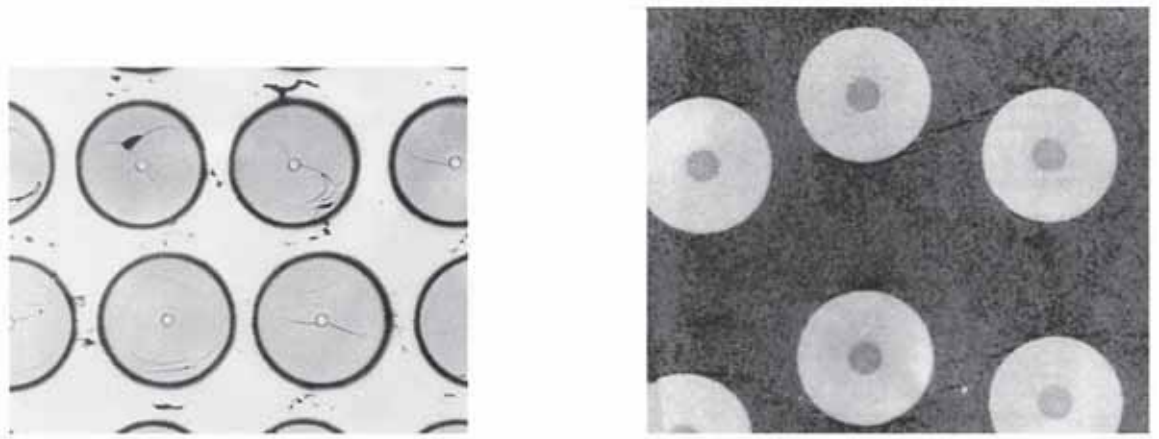


Figura 17-17 Métodos para producir fibras de *a*) boro y *b*) carbón.



a) *b*)

Figura 17-18 Micrografías de dos compuestos reforzados con fibra: *a*) aluminio reforzado con fibras de Borsic, compuestas de una capa gruesa de boro depositada sobre un filamento de tungsteno de pequeño diámetro (1000 ×). (*Fuente: ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International*. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org) *b*) En esta microestructura de un compuesto con matriz de cerámica y fibras cerámicas se usan fibras de carburo de silicio para reforzar una matriz de nitruro de silicio. La fibra SiC se deposita en forma de vapor en un pequeño filamento precursor de carbono (125 ×). (Cortesía del Dr. R.T. Bhatt, NASA Lewis Research Center.)

17-17*b*)]. El filamento orgánico, conocido como **precursor**, por lo general está hecho con rayón (un polímero celulósico), poliacrilonitrilo (PAN) o resina (diversos compuestos orgánicos aromáticos). Las altas temperaturas desintegran el polímero orgánico, expulsando todos los elementos, excepto el carbono. Conforme se incrementa la temperatura de carbonizado de 1000 a 3000ºC, la resistencia a la tensión se reduce, mientras que el módulo de elasticidad se incrementa (figura 17-19). El estirado de los filamentos de carbono en ciertos momentos específicos de la carbonización puede producir las orientaciones preferidas deseables en el filamento de carbono final.

Los **bigotes** son cristales individuales con proporciones dimensionales de 20 a 1000. Dado que los bigotes no contienen ninguna dislocación móvil, el deslizamiento no puede ocurrir y exhiben resistencias excepcionalmente altas. En vista del complejo proceso que se requiere para la producción de bigotes, su costo puede ser bastante alto.

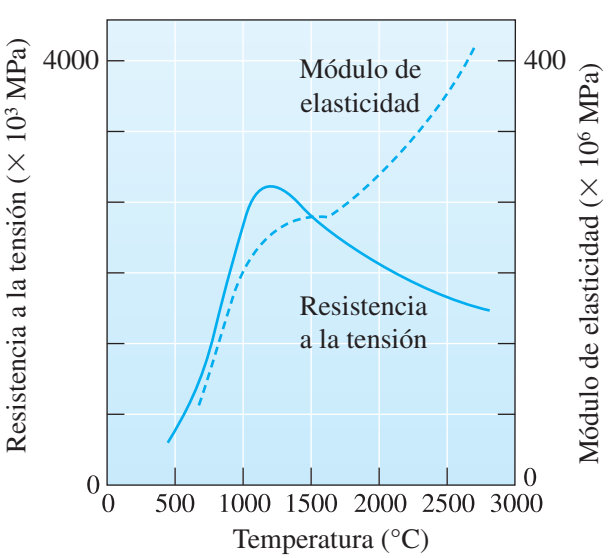


Figura 17-19 Efecto de la temperatura de un tratamiento térmico sobre la resistencia y el módulo de elasticidad de las fibras de carbono.

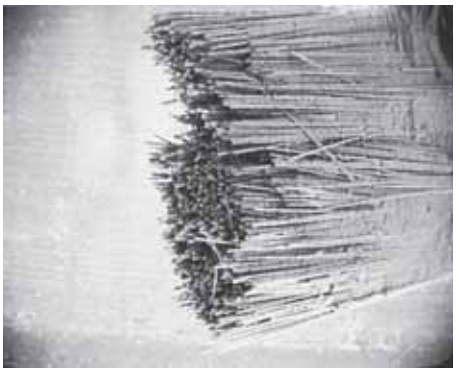


Figura 17-20 Micrografía electrónica de barrido de una mecha de carbono, con múltiples filamentos individuales de carbono (200 ×). (*Reimpresa por cortesía de Don Askeland.*)

Distribución de las fibras

Los filamentos excepcionalmente finos se reúnen en forma de hilados, hilos o mechas. En los **hilos** se retuercen hasta 10,000 filamentos para producir la fibra. Una **mecha** contiene desde unos cientos a más de 100,000 filamentos sin retorcer (figura 17-20). Los **hilados** son paquetes sin retorcer de filamentos, hilos o mechas.

A menudo las fibras se cortan en tramos de 1 cm o menos. Estas fibras, conocidas también como **hebras**, son fáciles de incorporar en la matriz y son comunes en los compuestos de moldeo de láminas y de moldeo volumétrico para compuestos de matriz polimérica. Con frecuencia las fibras están presentes dentro del compuesto con una orientación al azar o aleatoria.

Para compuestos de matriz polimérica, se pueden procesar fibras largas o continuas en forma de esteras o telas. Las *esteras* contienen fibras sin tejer orientadas al azar y sujetas apenas por una resina polimérica. Las fibras también se pueden entramar, trenzar y tejer en tejidos bidimensionales o tridimensionales. Después los tejidos se impregnan con una resina polimérica. En este punto del proceso las resinas todavía no se han polimerizado por completo; estas esteras o telas se conocen como **preformas**.

Cuando es necesario introducir fibras alineadas de manera unidireccional en una matriz polimérica, se pueden producir **cintas**. Las fibras individuales se pueden desenrollar desde carretes sobre un mandril, que determina el espaciamiento de las fibras individuales e impregnadas y reforzadas con una resina polimérica. Estas cintas, con un grosor de sólo un diámetro de fibra, pueden tener un ancho hasta de 120 cm. Como se ilustra en la figura 17-21, las cintas también pueden fabricarse cubriendo las fibras con capas superiores e inferiores de hoja metálica, que después se juntan mediante un proceso denominado unión por difusión.

Producción del compuesto

Para la producción de piezas compuestas se utilizan diversos métodos, lo que dependerá de la aplicación y los materiales. Los compuestos reforzados con fibras cortas por lo general se elaboran mezclando las fibras en una matriz líquida o plástica, y utilizando después técnicas relativamente convencionales como el moldeo por inyección para los compuestos en matriz polimérica o el vaciado para compuestos de matriz metálica. Los compuestos con matriz polimérica también pueden producirse mediante un método de aspersión, en el cual fibras cortas mezcladas con una resina se rocían contra un molde y después se curan.

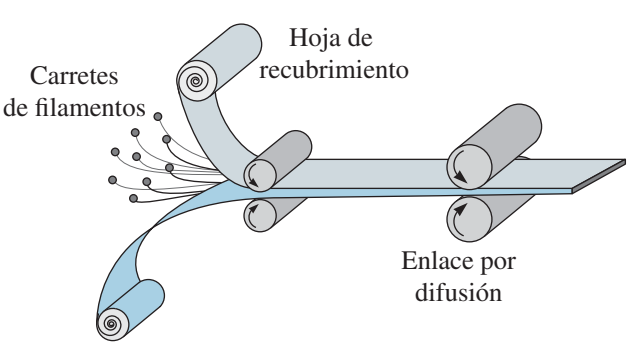


Figura 17-21 Producción de cintas de fibra con encapsulado de fibras entre láminas de metal mediante unión por difusión.

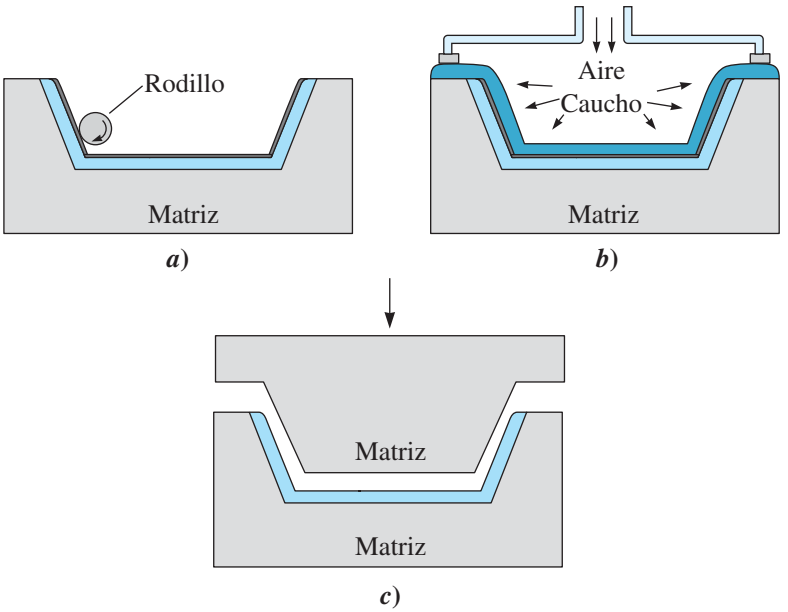


Figura 17-22 Producción de formas de materiales compuestos en matrices *a*) a mano, *b*) mediante moldeo a presión y *c*) por moldeo en matrices macho y hembra.

Sin embargo, se han diseñado técnicas especiales para la producción de compuestos usando fibras continuas, ya sea en forma alineada de manera unidireccional, en estera o en tejido (figura 17-22). En técnicas de elaboración manual, las cintas, esteras o tejidos se extienden sobre una forma, saturada con resina polimérica, y se presionan para asegurar un buen contacto y una completa eliminación de la porosidad, tras lo cual se curan. De esta manera se pueden fabricar carrocerías de automóviles o camiones con fibra de vidrio, lo cual suele ser una operación lenta y que requiere mucha mano de obra.

Las cintas y las telas también se pueden colocar en un dado y pueden formarse mediante el moldeo por bolsa. Se introducen gases a alta presión o se provoca un vacío para obligar a las capas individuales a que se junten a fin de que durante el curado se obtenga una unión adecuada. Con estas técnicas se han fabricado grandes componentes de matriz polimérica para el forro del fuselaje de aviones militares. En el moldeo en matrices macho y hembra se colocan fibras cortas o esteras en una matriz hecha de dos piezas; al cerrarse dicha matriz se obtiene la forma deseada.

El **enrollado de filamentos** se usa para producir componentes como recipientes a presión y piezas fundidas para motores a reacción (figura 17-23). Las fibras se enrollan alrededor de una forma o de un mandril para formar de manera gradual una figura sólida que incluso puede llegar a medir varios pies de espesor. El filamento puede estar sumergido en la resina de la matriz polimérica antes de su enrollado, o esta resina se puede impregnar alrededor del filamento durante o después del enrollado. El curado completa la producción de la pieza.

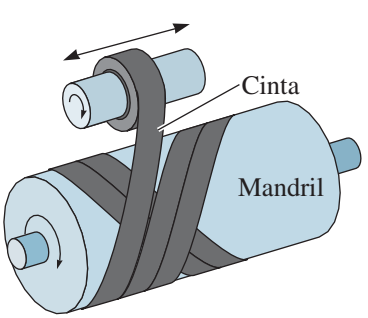


Figura 17-23 Producción de formas de materiales compuestos mediante el enrollado de filamentos.

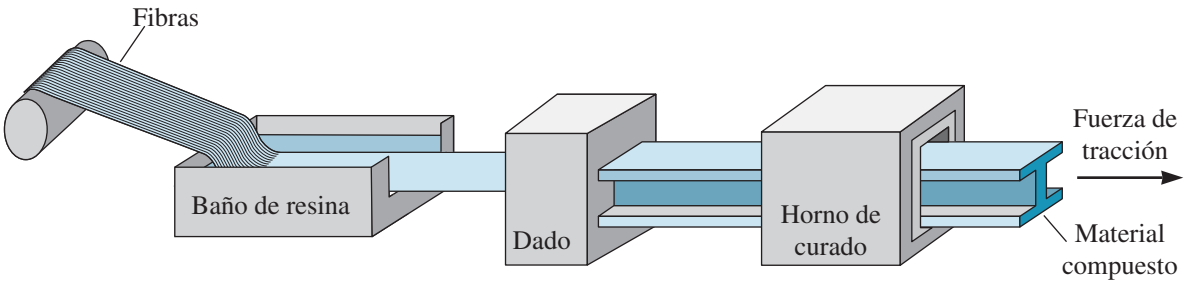


Figura 17-24 Producción de formas de materiales compuestos mediante extrusión por estirado.

Se utiliza **extrusión por estirado** (pultrusión) para formar un producto de manera simple con sección transversal uniforme, por ejemplo formas redondas, rectangulares, tuberías, placas o láminas (figura 17-24). Las fibras o las esteras son estiradas desde los carretes, pasadas por un baño de resina polimérica para su impregnación y unidas para producir una forma específica antes de entrar en un dado caliente para su curado. El curado de la resina se efectúa casi de inmediato, por lo que se fabrica un producto de forma continua. El material extruido puede conformarse en formas más complejas, como cañas de pescar, palos de golf y bastones para esquíes.

Los compuestos de matriz metálica con fibras continuas son más difíciles de producir que los compuestos de resina polimérica. También pueden aplicarse procesos de vaciado o colado que obligan al líquido a pasar alrededor de las fibras por ascensión capilar, colado a presión, infiltración por vacío o colado continua. También es posible utilizar varios procesos de compactación en estado sólido.

17-6 Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones

Antes de concluir el análisis de los compuestos reforzados con fibras hay que observar el comportamiento y las aplicaciones de algunos de los más comunes de estos materiales. La figura 17-25 compara el módulo y la resistencia específicos de varios materiales compuestos con los de metales y polímeros. Observe que los valores en esta figura son menores que los que aparecen en la figura 17-14, ya que ahora es material compuesto y no sólo fibra.

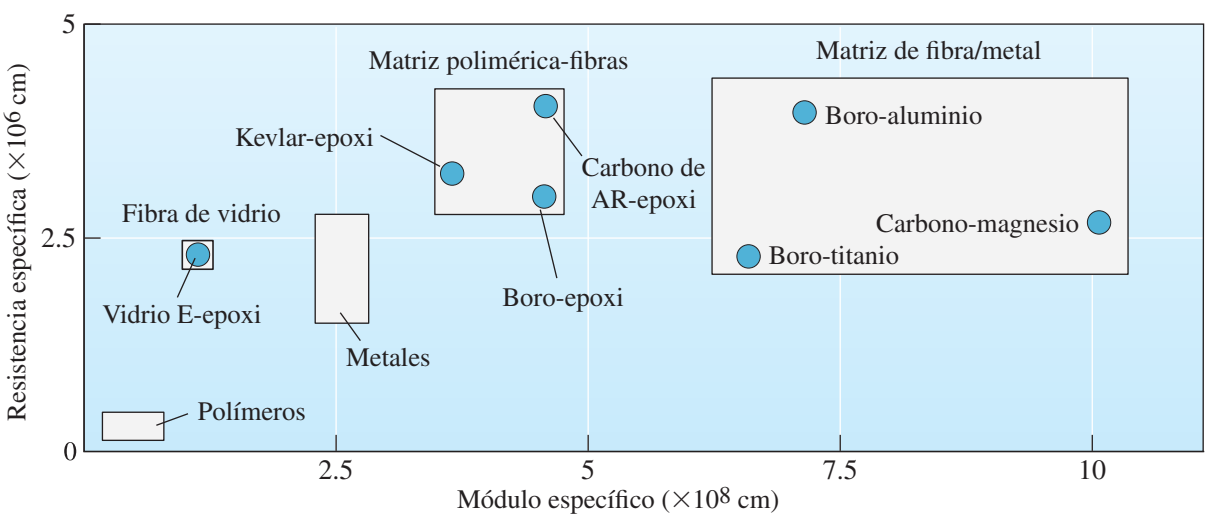


Figura 17-25 Comparación del módulo y la resistencia específicos de varios materiales compuestos con respecto a los de metales y polímeros.

Tabla 17-3 Ejemplos de materiales reforzados con fibras y sus aplicaciones

Material	Aplicaciones
Aluminio-Borsic	Aspas de ventilador en motores, otras aplicaciones en la industria aérea y aeroespacial.
Kevlar^{MR}-epoxi y Kevlar^{MR} poliéster	Aplicaciones aéreas y aeroespaciales, cascos para embarcaciones, artículos deportivos (raquetas de tenis, palos de golf, cañas de pescar), chalecos antibalas.
Polímero grafito	Aplicaciones aéreas, aeroespaciales y automotrices, artículos deportivos.
Polímero vidrio	Aplicaciones automotrices ligeras, marinas y para agua dulce, resistentes a la corrosión, artículos deportivos, componentes para aeronaves y aeroespaciales.

Compuestos avanzados

Es frecuente utilizar el término compuestos avanzados cuando se pretende que el compuesto sirva en aplicaciones de importancia crítica, como la industria aeroespacial (tabla 17-3). Por lo general, los compuestos avanzados son compuestos de matriz polimérica reforzados con un polímero, metal o fibras cerámicas de alta resistencia. Donde se requiera de una rigidez particularmente buena, las fibras de carbono tienen un uso extenso; las fibras de aramidas y, a un grado todavía mayor, las de polietileno son más adecuadas para aplicaciones de alta resistencia donde la tenacidad y resistencia a daños son más importantes. Por desgracia, las fibras poliméricas pierden su resistencia a temperaturas relativamente bajas, como ocurre en todas las matrices poliméricas (figura 17-26).

Los compuestos avanzados también se usan con frecuencia para fabricar artículos deportivos. En muchos casos, las raquetas de tenis, los palos de golf, los esquíes, los bastones de esquí y las cañas de pescar contienen fibras de carbono o de aramidas, debido a que con una mayor rigidez se obtiene un mejor desempeño. En el caso de los palos de golf, las fibras de carbono hacen posible un menor peso en el vástago y, por lo tanto, más peso en la cabeza. Para el velamen ligero de yates de competencia se usan telas reforzadas con fibras de polietileno.

Una aplicación que es única para las fibras de aramidas es el blindaje. Los tenaces compuestos de Kevlar^{MR} proporcionan mejor protección contra impactos de bala en comparación con otros materiales; esto los hace adecuados para ropa ligera, a prueba de balas y flexible.

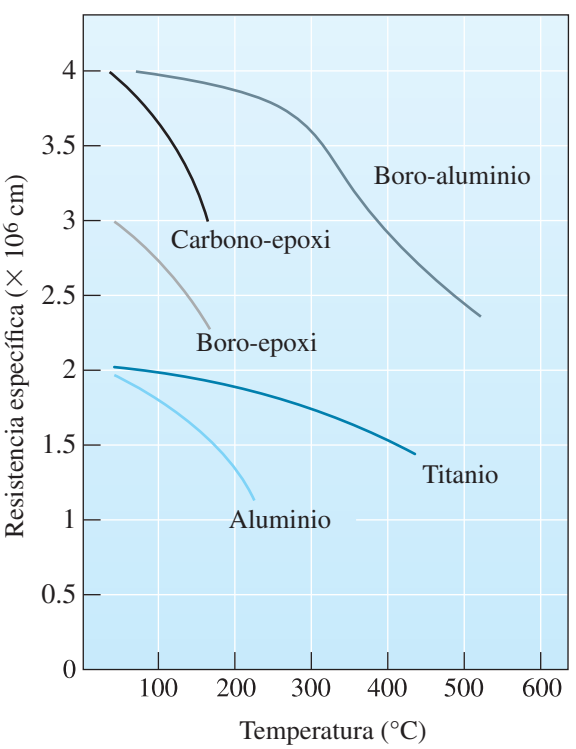


Figura 17-26 Gráfica de resistencia específica contra temperatura para varios compuestos y metales.

Los compuestos híbridos están hechos con dos o más tipos de fibras. Por ejemplo, las fibras de Kevlar^{MR} se pueden combinar con fibras de carbono a fin de mejorar la tenacidad de un compuesto rígido, o bien se puede mezclar el Kevlar^{MR} con fibras de vidrio para mejorar la rigidez. Controlando las cantidades y la orientación de cada fibra, se puede obtener un ajuste particularmente bueno del compuesto.

También es posible producir compuestos de gran tenacidad si se tiene cuidado en la selección de los materiales y técnicas de procesamiento. Se puede obtener mejor tenacidad a la fractura en compuestos más bien frágiles al usar fibras largas, amorfas (como el polietereterketona, conocido como PEEK, o sulfuro de polifenileno, conocido como PPS), en vez de matrices cristalinas o con enlaces cruzados, matrices elastómeras termoplásticas o polímeros de red interpenetrante.

Compuestos de matriz metálica

Estos materiales, endurecidos con fibras metálicas o cerámicas, brindan una alta resistencia a altas temperaturas. El aluminio reforzado con fibras de Borsic ha encontrado un extenso uso en aplicaciones aeroespaciales que incluye puntales para el transbordador espacial. Ciertas aplicaciones con base en cobre se han reforzado con fibras de SiC para fabricar hélices de alta resistencia para barcos.

El aluminio se usa por lo general en los materiales compuestos de matriz metálica. Las fibras de Al_2O_3 refuerzan los pistones de ciertos motores diésel; en aplicaciones aeroespaciales, se usan fibras y bigotes de SiC, e incluso elementos para mejorar la rigidez y aletas de misiles; y el mástil de la antena de aluminio del telescopio Hubble está reforzado con fibras de carbono. Las fibras poliméricas, debido a sus bajas temperaturas de fusión y desintegración, por lo general se usan en una matriz metálica. Sin embargo, los *polimets* se fabrican al extruir en caliente polvos de aluminio y polímeros cristalinos líquidos de alta temperatura de fusión. Una reducción de 1000 a 1 durante el proceso de extrusión alarga el polímero al formar filamentos alineados y une las partículas de polvo de aluminio en una matriz sólida.

Los compuestos de matriz metálica pueden destinarse a aplicaciones importantes en componentes para motores a reacción o para aeronaves. Las superaleaciones reforzadas con fibras metálicas (como el tungsteno) o fibras cerámicas (como el SiC o el B_4N) conservan su resistencia a temperaturas altas, lo que permite que los motores a chorro funcionen con mayor eficiencia. De igual forma, el titanio y los aluminuros de titanio reforzados con fibras de SiC se usan en la fabricación de álabes y discos para turbinas.

Compuestos de matriz cerámica

Los compuestos que contienen fibras cerámicas en una matriz también cerámica también tienen infinidad de aplicaciones. A fin de ilustrar las propiedades únicas que se pueden lograr con dichos materiales, se analizan dos usos importantes.

Los compuestos de carbono-carbono (C-C) se utilizan en aplicaciones aeroespaciales debido a su extraordinaria resistencia a la temperatura. Éstos pueden operar a temperaturas de hasta 3000ºC, y, de hecho, son más resistentes a altas temperaturas que a bajas (figura 17-27). Los compuestos de carbono-carbono se construyen al ajustar un tejido de fibras de poliacrilonitrilo o de carbono para que se ajuste a la forma de un molde e impregne después el tejido con una resina orgánica, como una fenólica. La pieza se piroliza para convertir la resina fenólica en carbono. El compuesto, todavía blando y poroso, se impregna y piroliza varias veces más, lo que incrementa cada vez más su densidad, resistencia y rigidez. Finalmente, la pieza se recubre con carburo de silicio a fin de proteger el compuesto carbono-carbono contra la oxidación. Se pueden alcanzar resistencias de 2070 MPa, así como módulos de elasticidad de 345×10^3 MPa. Los compuestos carbono-carbono se han utilizado como conos de nariz y bordes de ataque de vehículos aeroespaciales de alto rendimiento, como el transbordador espacial, así como en discos de frenos de automóviles deportivos y aeronaves comerciales a reacción.

Los compuestos de fibras cerámicas en matriz cerámica logran resistencia y tenacidad a la fractura mejoradas, en comparación con materiales cerámicos convencionales (tabla 17-4). Los refuerzos de fibra mejoran la tenacidad de la matriz cerámica de varias formas. Primero, una grieta que se mueva por la matriz encuentra una fibra si la unión entre matriz y fibra es mala, o la grieta se ve obligada a seguir alrededor de la fibra para continuar el proceso de fractura. Además, una unión deficiente provoca que la fibra comience a salirse de la matriz [figura 17-28*a*)]. Ambos procesos consumen energía, lo que incrementa la tenacidad a la fractura. Finalmente, conforme surge una grieta

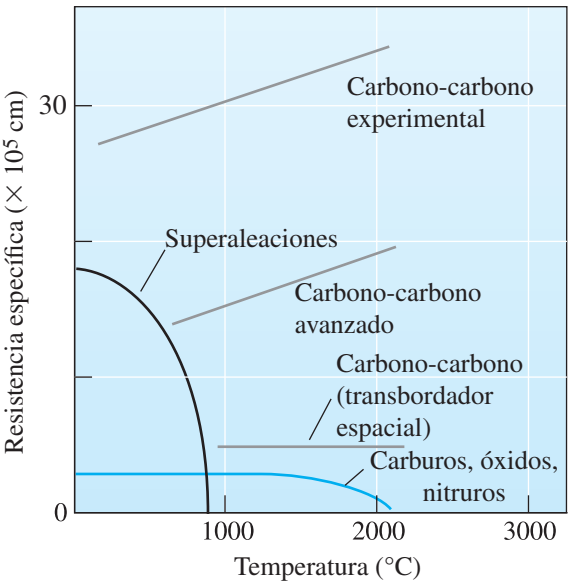


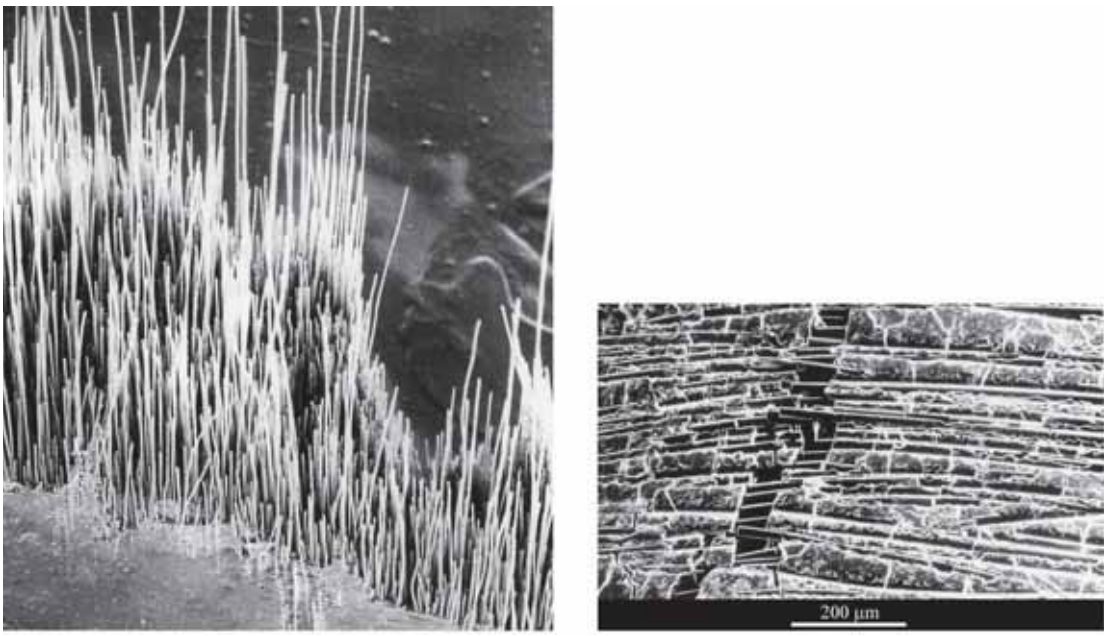
Figura 17-27 Comparación de las resistencias específicas de varios materiales compuestos carbono-carbono con las de otros materiales para altas temperaturas, en función de la temperatura.

Tabla 17-4 Efecto de las fibras de refuerzo de SiC sobre las propiedades de algunos materiales cerámicos

Material	Resistencia a la flexión (MPa)	Tenacidad a la fractura (MPa $\sqrt{m}$)
Al_2O_3	550	5.5
Al_2O_3/SiC	790	8.8
SiC	500	4.4
SiC/SiC	760	25.3
ZrO_2	210	5.5
ZrO_2/SiC	450	22.2
Si_3N_4	470	4.4
Si_3N_4/SiC	790	56.0
Vidrio	60	1.1
Vidrio/SiC	830	18.7
Vidrio cerámico	210	2.2
Vidrio cerámico/SiC	830	17.6

en la matriz, algunas fibras que no estén rotas pueden servir de puente en la grieta, lo que permite aportar un esfuerzo de compresión que ayuda a que la grieta no se abra [figura 17-28*b*)].

A diferencia de los compuestos de matriz polimérica y metálica, lo que se requiere es una mala unión, no una buena. En consecuencia, es determinante un buen control de la estructura de la interfase. En un cerámico vítreo (con base en $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot Li_2O$) reforzado con fibras de SiC y empleando Nb_2O_5 como aditivo, se produce una capa de interfase que contiene carbono y NbC, que facilita la separación de la fibra de la matriz. Sin embargo, si el compuesto se calienta a alta temperatura, la interfase se oxida; el óxido ocupa un volumen considerable y ejerce una fuerza de sujeción sobre las fibras, lo que impide una extracción fácil, con lo que disminuye la tenacidad a la fractura. El ejemplo 17-10 ilustra algunos de los aspectos del costo y las propiedades que se presentan al trabajar con compuestos.



a) *b*)

Figura 17-28 Dos tipos de falla en materiales compuestos cerámica-cerámica: *a*) Una excesiva extracción de las fibras de SiC en una matriz de vidrio logra una buena tenacidad para el material compuesto (20×). [*Fuente: ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternaitonal.org.*] *b*) Puentes de fibras de una matriz agrietada en una cerámica de aluminio, silicato y magnesio reforzada con fibras. La dureza del material cerámico compuesto mejora cuando los puentes de las fibras generan grietas. (*Cortesía de Dr. Kevin M. Knowles/ DoITPoMS Micrograph Library, www.doitpoms.ac.uk*)

Ejemplo 17-10 *Diseño de un puntal compuesto*

Diseñe un puntal de matriz de resina epóxica reforzada unidireccionalmente por fibras de sección transversal redonda. El puntal mide 3 m de largo, y al aplicar una fuerza de 2224 N no debe estirarse más de 0.25 cm. Es necesario asegurarse de que el esfuerzo que actúa sobre el puntal sea inferior a la resistencia a la fluencia de la matriz epóxica (83 MPa). En caso de ruptura de las fibras, el puntal se estirará una distancia adicional, pero no debe fracturarse catastróficamente. La resina epóxica tiene un costo aproximado de $1.80 por kilogramo, un módulo de elasticidad de 3450 MPa y una densidad de 1.25 g/cm^3.

SOLUCIÓN

Suponga que el puntal se fabrica sólo de material epóxico (es decir, sin fibras):

$$\varepsilon_{máx} = \frac{0.25 \text{ cm}}{300 \text{ cm}} = 0.00083 \text{ cm/cm}$$

$$\sigma_{máx} = E\varepsilon_{máx} = (3450)(0.00083) = 2.9 \text{ MPa}$$

$$A_{puntal} = \frac{F}{\sigma_{máx}} = \frac{2224 \text{ N}}{2.9 \text{ MPa}} = 7.67 \text{ cm}^2 \quad \text{o} \quad d = 3.12 \text{ cm}$$

$$\text{Peso}_{puntal} = (1.25)(\pi)(3.12/2)^2(300) = 2.87 \text{ kg}$$

$$\text{Costo}_{puntal} = (2.87 \text{ kg})(\$1.8/\text{kg}) = \$5.17$$

Sin ningún refuerzo, el puntal resulta grande y pesado; el costo de los materiales es alto debido a la gran cantidad de material epóxico necesario.

En un compuesto, la deformación máxima sigue siendo de 0.00083 cm/cm. Si se fabrica el puntal lo más pequeño posible, es decir, operando a 83 MPa, entonces el módulo de elasticidad mínimo E_c del compuesto es

$$E_c > \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\varepsilon_{\text{máx}}} = \frac{83}{0.00083} = 100 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Existen varios sistemas de compuestos posibles. El módulo de las fibras de vidrio es menor de 100×10^3 MPa, por lo tanto, un refuerzo de vidrio no es una elección posible.

Para fibras de carbono de alto módulo, $E = 531 \times 10^3$ MPa, la densidad es de 1.9 g/cm^3, y el costo es aproximadamente de $66 por kilogramo. La fracción volumétrica mínima de fibras de carbono requeridas para obtener un módulo para el compuesto de 100×10^3 MPa es

$$E_c = f_c(531 \times 10^3) + (1 - f_c)(3.45 \times 10^3) > 100 \times 10^3$$
$$f_c = 0.183$$

La fracción volumétrica de epóxico que resta es 0.817. Una superficie 0.817 veces la sección transversal del puntal debe soportar una carga de 2224 N con no más de 83 MPa, en caso de que fallaran todas las fibras:

$$A_{\text{epóxico}} = 0.817A_{\text{total}} = \frac{F}{\sigma_{\text{máx}}} = \frac{2224 \text{ N}}{83 \text{ MPa}} = 0.268 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total}} = \frac{0.268}{0.817} = 0.328 \text{ cm}^2 \quad \text{or} \quad d = 0.646 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen}_{\text{puntal}} = (0.328 \text{ cm}^2)(300 \text{ cm}) = 98.4 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso}_{\text{puntal}} = \rho\text{Volumen}_{\text{puntal}} = [(1.9)(0.183) + (1.25)(0.817)]$$
$$= 0.135 \text{ kg}$$

Para calcular la fracción en peso del carbono, considere 1 cm^3 de compuesto. Entonces la fracción en peso del carbono estará dada por

$$\text{Fracción en peso}_{\text{carbono}} = \frac{(0.183)(1.9)}{(0.183)(1.9) + (0.817)(1.25)}$$
$$= 0.254$$

y el peso total del carbono en el compuesto es

$$\text{Peso}_{\text{carbono}} = (0.254)(0.135 \text{ kg}) = 0.034 \text{ kg}$$

Del mismo modo, la fracción en peso del epóxico se calcula como

$$\text{Fracción en peso}_{\text{epóxico}} = \frac{(0.817)(1.25)}{(0.183)(1.9) + (0.817)(1.25)}$$
$$= 1 - 0.254 = 0.746$$

y el peso total del epóxico en el compuesto es

$$\text{Peso}_{\text{epóxico}} = (0.746)(0.135\text{kg}) = 0.101 \text{ kg}$$

Por lo tanto,

$$\text{Costo}_{\text{puntal}} = (0.034 \text{ kg})(\$66/\text{kg}) + (0.101 \text{ kg})(\$1.80/\text{kg}) = \$2.42$$

El puntal reforzado con fibras de carbono tiene menos de una cuarta parte del diámetro de una estructura epóxica, con sólo 5% del peso y la mitad del costo.

También podrían repetirse estos cálculos al usar fibras de Kevlar^{MR}, que tienen un módulo de 124×10^3 MPa, una densidad de 1.44 g/cm^3 y un costo de alrededor de $44 por kilogramo. Si se hace así, el resultado es que se necesita una fracción volumétrica de 0.8 fibras. Tenga en cuenta que 0.8 es la máxima fracción volumétrica que puede incorporarse en una matriz. También se encontrará que el diámetro requerido del puntal es de 1.288 cm y que pesa 0.573 kg, con un costo de $20.94. El módulo del Kevlar^{MR} no es lo suficientemente alto como para compensar su alto costo. A pesar de que las fibras de carbono son las más costosas, permiten la fabricación del puntal más

ligero y el de menor costo de materiales. (Sin embargo, este cálculo no toma en consideración el costo de fabricación de la pieza.) Por lo tanto, la solución es usar un puntal de 0.646 cm de diámetro con una fracción volumétrica de 0.183 de fibras de carbono de alto módulo.

17-7 Materiales compuestos laminares

Los compuestos laminares comprenden recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, chapados bimetálicos, laminados y todo un conjunto de diversas aplicaciones. Además, también es posible considerar como parcialmente laminares a los compuestos reforzados con fibra producidos en forma de cintas o tejidos. Muchos de ellos están diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión, a la vez que mantienen un bajo costo, una alta resistencia o un peso ligero. Otras características importantes son una resistencia superior al desgaste o a la abrasión, una mejor apariencia y una expansión térmica fuera de lo común.

Regla de las mezclas

Algunas de las propiedades de los compuestos laminares semejantes a las laminillas se estiman a partir de la regla de las mezclas. La densidad, la conductividad eléctrica y térmica, así como los módulos de elasticidad en dirección paralela a las laminillas, se pueden calcular con un error insignificante al utilizar las fórmulas siguientes:

$$\text{Densidad} = \rho_{c,\parallel} = \sum (f_i \rho_i) \tag{17-12}$$

$$\text{Conductividad eléctrica} = \sigma_{c,\parallel} = \sum (f_i \sigma_i)$$

$$\text{Conductividad térmica} = k_{c,\parallel} = \sum (f_i k_i) \tag{17-13}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = E_{c,\parallel} = \sum (f_i E_i)$$

Los compuestos laminares son altamente anisotrópicos. Las propiedades en dirección perpendicular a las laminillas son

$$\text{Conductividad eléctrica} = \frac{1}{\sigma_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{\sigma_i} \right)$$

$$\text{Conductividad térmica} = \frac{1}{k_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{k_i} \right) \tag{17-14}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{1}{E_{c,\perp}} = \sum \left(\frac{f_i}{E_i} \right)$$

Muchas otras propiedades, como la resistencia a la corrosión y al desgaste, dependen principalmente de sólo uno de los componentes del compuesto, de modo que la regla de las mezclas no es aplicable.

Producción de compuestos laminares

Para producir compuestos laminares se usan varios métodos, incluyendo diversas técnicas de deformación y de unión que se utilizan principalmente para los metales (figura 17-29).

Con frecuencia, cada una de las capas se une a las adyacentes mediante una *unión adhesiva*, como en la fabricación del triplay o madera contrachapada. Los compuestos de matriz polimérica elaborados a partir de varias capas de fibras de preformas de tejido o de cinta también se unen por medio de adhesivos, para lo cual se coloca una película delgada de material no polimerizado entre cada capa de la preforma. Cuando estas capas se presionan entre sí a temperaturas altas, se completa la polimerización y las fibras de la preforma quedan unidas para producir compuestos que llegan a tener docenas de capas de espesor.

La mayoría de los compuestos laminares metálicos (como revestimientos y bimetálicos) se producen por *unión por deformación*, como unión con rodillo caliente o frío. La presión que ejercen los rodillos rompe la película de óxido de la superficie, lo que coloca a las dos superficies en contacto

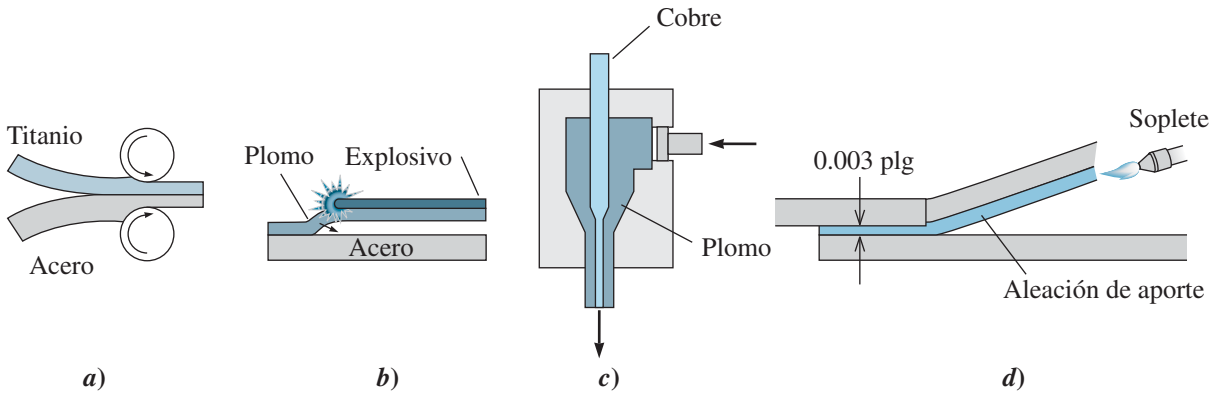


Figura 17-29 Técnicas para producir compuestos laminares: *a*) unión por laminación, *b*) unión por explosión, *c*) coextrusión y *d*) soldadura con aporte.

atómico y permite que se unan. También se puede utilizar unión por explosión. Una carga explosiva proporciona la presión necesaria para unir los metales. Este proceso es particularmente adecuado para unir placas muy grandes que no se puedan introducir en un tren de laminación. Los compuestos laminares muy simples, como el cable coaxial, se fabrican coextruyendo dos materiales a través de un dado, de tal forma que el material blando rodee al más duro. El alambre conductor metálico puede recubrirse de esta manera con un polímero termoplástico aislante.

La **soldadura fuerte** puede unir placas de compuestos (capítulo 9). Las hojas metálicas, separadas por un espacio muy pequeño (aproximadamente de 0.0075 cm), se calientan por encima de la temperatura de fusión de la aleación de aporte. La aleación de aporte fundida es atraída hacia la unión mediante acción capilar.

17-8 Ejemplos y aplicaciones de compuestos laminares

La cantidad de compuestos laminares es tan variada y sus aplicaciones y objetivos tan numerosos que no es posible efectuar generalizaciones con respecto a su comportamiento. En cambio, se analizarán las características de algunos ejemplos de uso común.

Laminados

Los laminados son capas de materiales unidas por un adhesivo orgánico. En el vidrio de seguridad laminado, dos piezas de vidrio se unen mediante un adhesivo plástico como el polivinilo butiral (PVB); el adhesivo impide que los fragmentos de vidrio salgan impelidos al romperse la pieza (capítulo 15). Los laminados se utilizan como aislamiento en motores, para engranes, tarjetas de circuitos impresos y elementos decorativos, como las cubiertas de Formica®.

Los *microlaminados* incluyen materiales compuestos formados por capas alternas de hojas de aluminio y de polímero reforzado con fibras. El *Arall* (laminado de aluminio y aramidas) y el *Glare* (laminado de aluminio y vidrio) son dos ejemplos. En el Arall se prepara una fibra de aramidas como el Kevlar^{MR}, un tejido o una cinta unidireccional, se impregna con un adhesivo y se lamina entre capas de una aleación de aluminio (figura 17-30). El laminado compuesto tiene una combinación poco común de resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión y poco peso. La resistencia a la fatiga se mejora, ya que la interfase entre las capas puede detener las grietas. El Glare tiene propiedades semejantes y se emplea en el fuselaje del Airbus 380. En comparación con compuestos de matriz polimérica, los microlaminados tienen una buena resistencia a daños por descargas eléctricas (lo cual es importante en aplicaciones aeroespaciales), y son fáciles de conformar, maquinar y reparar.

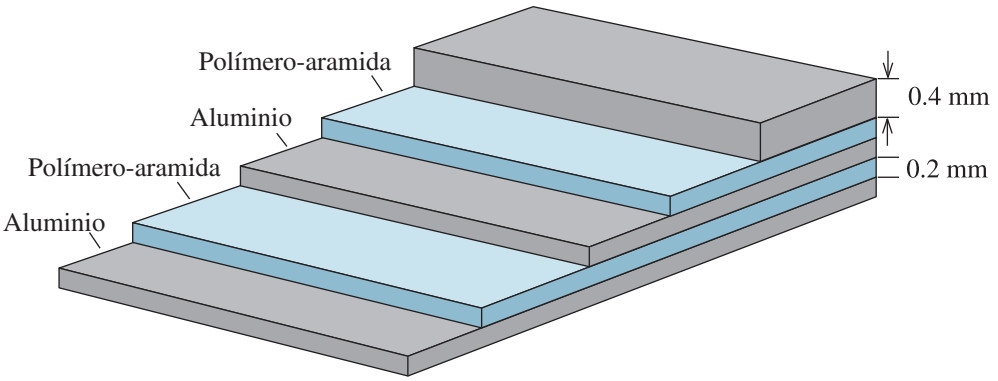


Figura 17-30 Diagrama esquemático del Arall, un laminado de aluminio-aramida.

Metales revestidos

Este tipo de metales son compuestos de metal con metal. Un ejemplo común del **revestimiento** son las monedas plateadas de Estados Unidos. Una aleación de Cu-80% de Ni se une en ambas caras de una aleación Cu-20% Ni. La relación de espesores es de aproximadamente 1/6:2/3:1/6. La aleación de alto nivel de níquel tiene un color plateado, en tanto que el núcleo, donde predomina el cobre, tiene un bajo costo.

Los materiales revestidos presentan una combinación de buena resistencia a la corrosión con alta resistencia. El *Alclad* es un compuesto revestido en el cual se une aluminio comercialmente puro con aleaciones de aluminio de alta resistencia. El aluminio puro protege contra la corrosión a la aleación de mayor resistencia. El espesor de la capa de aluminio puro es de entre 1 y 15% del espesor total. El Alclad se utiliza en la construcción de aeronaves, intercambiadores de calor, elementos de construcción de edificios y tanques de almacenamiento, donde se desea tener una buena combinación de resistencia, tolerancia a la corrosión y bajo peso.

Bimetálicos

Los indicadores y controladores de temperatura aprovechan los diferentes coeficientes de expansión térmica de dos metales distintos en un compuesto laminar. Si se calientan las dos piezas de metal, el metal que tenga un coeficiente de expansión térmica más alto se alargará más. Si ambas piezas están rígidamente unidas entre sí, la diferencia de sus coeficientes hará que la tira metálica se tuerza, lo que producirá una superficie curva. La cantidad de movimiento depende de la temperatura. Al medir la curvatura o la deflexión de la tira, es posible determinar dicha temperatura. De igual forma, si el extremo libre de la tira activa un relevador, ésta puede servir para conectar o desconectar un calentador o un equipo acondicionador de aire a fin de regular la temperatura. Los metales que se seleccionan para los **bimetales** deben tener *a*) coeficientes de expansión térmica muy distintos, *b*) características de expansión reversibles y repetibles, y *c*) gran elasticidad para realizar un trabajo. Es frecuente que la tira de baja expansión se haga de Invar, una aleación de hierro-níquel, en tanto que la tira de alta expansión puede fabricarse de latón, Monel o níquel puro.

Los bimetálicos pueden actuar como interruptores o termostatos; si la corriente que pasa por la tira es demasiado alta, el calentamiento hará que se flexione el bimetálico y se abra el circuito.

17-9 Estructuras tipo emparedado o sandwich

Los materiales tipo **emparedado** (o intercalados) tienen capas delgadas de material de recubrimiento unidas a un material de relleno ligero, como una espuma de polímero. Ni el relleno ni el material de recubrimiento son materiales rígidos o resistentes, pero el compuesto sí tiene ambas propiedades. Un ejemplo conocido de este tipo de material son las láminas de cartón acanalado, en las que un núcleo de papel se une por ambos lados a un papel liso y grueso. Ni el núcleo acanalado o corrugado ni el papel de recubrimiento son rígidos, pero la combinación sí lo es.

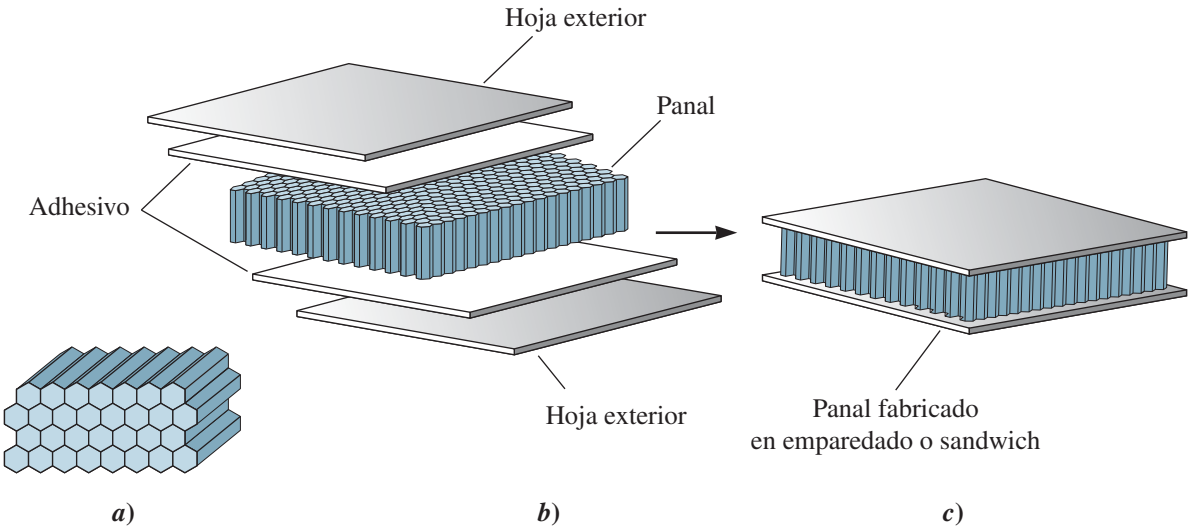


Figura 17-31 *a*) Núcleo en forma de panal de celdas hexagonales, *b*) que se puede unir a dos hojas mediante capas de adhesivo y que *c*) puede producir una estructura de panal emparedado excepcionalmente ligera, aunque rígida y fuerte.

Otro ejemplo importante es la estructura de panal que se utiliza en aplicaciones aeronavales. Se produce un **panal** pegando una tira delgada de aluminio en lugares seleccionados. El material del panal se expande después para producir un panel celular de muy baja densidad que, por sí mismo, es inestable (figura 17-31). Sin embargo, si se adhieren hojas de aluminio a ambos lados del panel, se obtiene un emparedado excepcionalmente ligero, muy rígido y fuerte, con una densidad de hasta 0.04 g/cm^3.

Las celdas del panal tienen diversas formas (hexagonales, cuadradas, rectangulares o senoidales) y se pueden fabricar de aluminio, fibra de vidrio, papel, polímeros de aramidas y otros materiales. Las celdas de panal se pueden rellenar con espuma o fibra de vidrio para lograr una excelente absorción de sonidos y vibraciones. La figura 17-32 describe un método con el que se puede fabricar el panal.

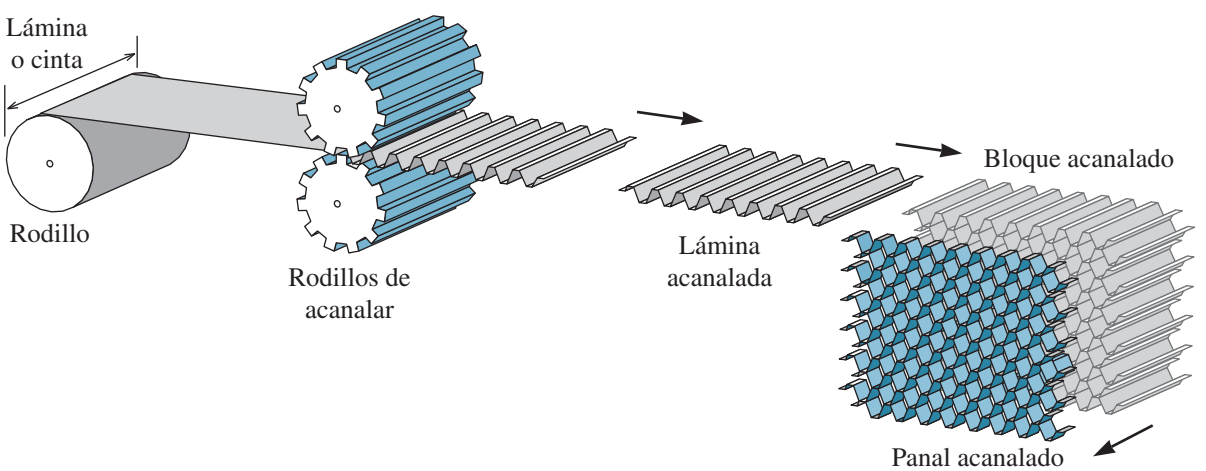


Figura 17-32 En el método de acanalado para producir un núcleo en panal, el material (por ejemplo, aluminio) es acanalado por dos rodillos. Las hojas acanaladas se unen entre sí con un adhesivo y después se cortan al espesor deseado.

Resumen

- Los compuestos están formados por dos o más materiales o fases unidas o conectadas para obtener una combinación de propiedades que no podrían obtenerse de otra manera. Para la determinación de las propiedades es muy importante la fracción volumétrica y la conectividad de fases o materiales en un compuesto, así como la naturaleza de la interfase entre la fase dispersa y la matriz.
- Cualquier combinación de metales, polímeros y materiales cerámicos es prácticamente posible. En muchos casos es factible utilizar la regla de las mezclas para estimar las propiedades del compuesto.
- Los compuestos tienen numerosas aplicaciones en las industrias de la construcción, aeroespacial, automotriz, deportiva, microelectrónica y otras.
- Los materiales endurecidos por dispersión contienen partículas de óxido en una matriz metálica. Los pequeños dispersoides estables interfieren con el deslizamiento, dándole buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas.
- Los compuestos particulados contienen partículas que imparten combinaciones de propiedades al compuesto. Los compuestos de matriz metálica contienen partículas cerámicas o metálicas que le proporcionan mejor resistencia al desgaste y aseguran una buena conductividad eléctrica, tenacidad y resistencia a la corrosión. Los compuestos de matriz polimérica contienen partículas que incrementan la rigidez, la resistencia a la temperatura o la conductividad eléctrica, al tiempo que muestran un peso bajo, facilidad de fabricación y costo económico.
- Los compuestos reforzados con fibras proporcionan altos estándares en resistencia, rigidez o desempeño a altas temperaturas en metales y polímeros, así como tenacidad en los materiales cerámicos. Por lo general, las fibras son de baja densidad, lo que les dota de resistencia y un módulo específico altos, pero suelen ser muy frágiles. Las fibras pueden ser continuas o discontinuas; las discontinuas con una proporción dimensional l/d alta producen un mejor refuerzo que las que presentan una proporción baja.
- Las fibras se introducen en una matriz con una diversidad de orientaciones. Las orientaciones aleatorias y un comportamiento isotrópico se obtienen al usar fibras discontinuas; las fibras alineadas unidireccionalmente producen compuestos con un comportamiento anisotrópico, con gran resistencia y rigidez en la dirección paralela a las fibras. Para cumplir con las cargas impuestas, se pueden ajustar las propiedades al orientar las fibras en muchas direcciones.
- Los compuestos laminares están hechos de capas de materiales diferentes. Éstas pueden ser hojas de distintos metales; uno de ellos aportará la resistencia y el otro la dureza o la resistencia a la corrosión. Las capas también pueden incluir hojas de materiales reforzados con fibras unidas a hojas metálicas o poliméricas, o incluso a hojas reforzadas con fibras con orientaciones diferentes. Los compuestos laminares son siempre anisotrópicos.
- Los materiales tipo emparedado o sandwich (entre los que se incluyen los panales) son compuestos laminares de una extraordinaria ligereza, con caras sólidas unidas a un núcleo prácticamente hueco.

Glosario

Bigotes Fibras muy delgadas que han crecido de tal forma que producen cristales individuales sin dislocaciones móviles, lo que las dota de resistencias cercanas a las teóricas.

Bimetálico Compuesto laminar que se produce al unir dos tiras de metal, cada una con diferentes coeficientes de expansión, lo que hace sensible al compuesto ante cambios de temperatura.

Carbonización Eliminación de los átomos distintos del carbono de una fibra polimérica, lo que produce una fibra de carbono de alta resistencia. También se conoce como pirolización.

Carburos cementados Compuestos particulados que contienen partículas cerámicas duras unidas en una matriz metálica blanda. El compuesto combina una alta dureza con una alta capacidad de corte, conservando también una buena resistencia al impacto.

Cintas Una cinta de material preformado de un solo filamento de grosor. Los filamentos pueden ser unidireccionales o tejidos. Se pueden unir varias capas de cintas para producir estructuras compuestas.

Delaminación Separación de las capas individuales de un compuesto reforzado con fibras.

Deposición química de vapor [DQV] Método de manufactura de materiales que consiste en condensar el material en estado de vapor en un sustrato sólido.

Dispersoides Pequeñas partículas de óxido que se forman en una matriz metálica, que interfieren con los movimientos de dislocación y aportan endurecimiento incluso a altas temperaturas.

Emparedado Compuesto elaborado con un material ligero de baja densidad rodeado por capas densas sólidas. El emparedado combina un peso ligero general con una excelente rigidez.

Enrollado de filamentos Proceso para la producción de compuestos reforzados con fibras, en el que se enrollan fibras continuas alrededor de una forma o un mandril. Las fibras pueden estar en preforma o la estructura con el filamento enrollado se puede impregnar para completar la producción del material compuesto.

Extrusión por estirado Proceso continuo de fabricación en el que las fibras o esteras se impregnan con resinas poliméricas y se jalan a través de una matriz para obtener una forma con intersecciones constantes.

Fase dispersa Fase o fases que se han dispersado en una matriz continua del compuesto.

Fase matriz Fase continua dentro de un compuesto. Los compuestos se identifican según la fase continua (por ejemplo, compuestos de matriz polimérica).

Fibras de aramidas Fibras poliméricas (como el Kevlar^{MR})formadas a partir de poliamidas, las cuales contienen un anillo de benceno en la estructura del polímero.

Hebras Fibras cortadas en trozos pequeños.

Hilados Paquetes de filamentos, hilos o mechas no retorcidos.

Hilos Fibras continuas producidas a partir de un grupo de filamentos retorcidos.

Mechas Paquete de filamentos no torcidos.

Módulo específico Módulo de elasticidad dividido entre la densidad.

Nanocompuesto Material en el que la fase dispersa es del orden de nanometros y está distribuida en la matriz continua.

Panal Ensamble ligero pero rígido de una tira de aluminio unida y expandida para formar el núcleo de una estructura de tipo emparedado.

Precursor Producto químico iniciador (por ejemplo, una fibra polimérica) que se carboniza para la producción de fibras de carbono.

Preformas Capas de fibras en resinas no polimerizadas. Después de que los materiales de preforma se apilan para formar una estructura deseada, la polimerización une las capas.

Proporción dimensional Longitud de una fibra dividida entre su diámetro.

Recubierta Recubrimiento de fibras de vidrio con un material orgánico para mejorar la unión y resistencia a la humedad en fibras de vidrio.

Regla de las mezclas Enunciado que afirma que algunas de las propiedades de un compuesto pueden describirse como la suma de las propiedades de los materiales que lo componen ponderadas por sus fracciones volumétricas.

Resistencia específica Resistencia a la tensión o a la fluencia de un material dividida entre la densidad.

Revestimiento Compuesto laminar que se produce cuando una capa resistente a la corrosión, o de alta dureza, de un compuesto laminar se forma sobre un respaldo de menor costo o de una resistencia más alta.

Soldadura fuerte Proceso en el que un metal líquido de relleno se introduce por acción capilar entre dos materiales de base sólida que deben unirse. La unión se obtiene al solidificarse la aleación de aporte.

Problemas

Sección 17-1 Materiales compuestos endurecidos por dispersión

17-1 ¿Qué es un compuesto?

17-2 ¿De qué dependen las propiedades de los materiales compuestos?

17-3 Dé ejemplos de aplicaciones donde los compuestos se usan para soportar cargas.

17-4 Proporcione dos ejemplos de aplicaciones en los que los compuestos se usan para aplicaciones no estructurales.

17-5 ¿Qué es un compuesto endurecido por dispersión? ¿En qué se diferencia de un compuesto reforzado con partículas?

17-6 ¿Qué es un nanocompuesto? ¿Cómo es posible describir como compuestos a los aceros que contengan ferrita y martensita? Explique.

17-7 Encuentre el valor más grande y más pequeño de las diferencias en las resistencias entre el Borsic y el SAP, así como las temperaturas a las que éstas se presentan en la figura 17-2.

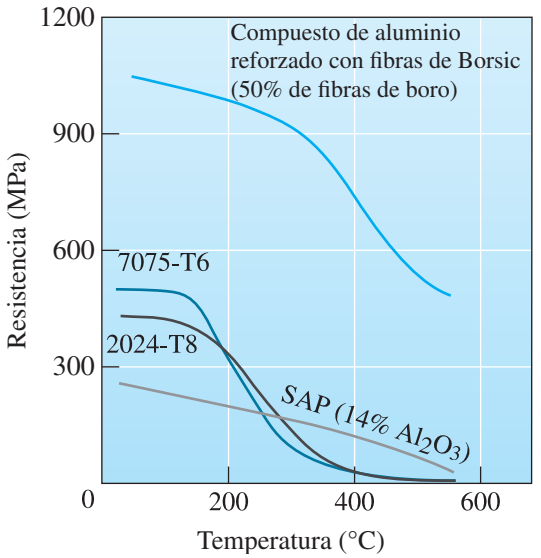


Figura 17-2 Comparación de resistencia a la fluencia del compuesto de polvo de aluminio sinterizado (PAS) y endurecido por dispersión, contra la resistencia a la fluencia de dos aleaciones de aluminio de alta resistencia convencionales de dos fases. (Repetida para el problema 17-7.)

17-8 Una matriz de tungsteno con 20% de porosidad está infiltrada con plata. Si se supone que los poros están interconectados, ¿cuál es la densidad del compuesto antes y después de la infiltración con plata? La densidad del tungsteno puro es de 19.25 g/cm^3 y la de la plata pura es de 10.49 g/cm^3.

17-9 Níquel con 2% en peso de torio se prepara en polvo, se consolida formando una pieza y se sinteriza en presencia de oxígeno, para que todo el torio genere esferas de ThO_2 de 80 nm de diámetro. Calcule el número de esferas por centímetro cúbico. La densidad del ThO_2 es de 9.69 g/cm^3.

17-10 Para crear una capa delgada de óxido, se trata un polvo de aluminio esférico (PAS) de 0.002 mm de diámetro, que después se usa para producir un material PAS endurecido por dispersión con 10% vol de Al_2O_3. Calcule el grosor promedio de la película de óxido antes de la compactación y sinterizado de los polvos de la pieza.

17-11 Mediante oxidación interna se introducen en el tungsteno partículas de itria (Y_2O_3) de 750 Å de diámetro. Mediciones hechas utilizando un microscopio electrónico muestran que hay 5×10^{14} partículas de óxido por centímetro cúbico. Calcule el porcentaje en peso del Y que existía originalmente en la aleación. La densidad de la Y_2O_3 es de 5.01 g/cm^3.

17-12 Sin tratamiento especial, se encuentra que el aluminio tiene comúnmente una capa de Al_2O_3 de 3 nm de grosor. Si el polvo de aluminio esférico preparado con un diámetro total de 0.01 mm se utiliza para producir el material PAS endurecido por dispersión, calcule el porcentaje volumétrico de Al_2O_3 en el material y en la cantidad de partículas de óxido por centímetro cúbico. Suponga que el óxido se rompe en escamas en forma de disco de 3 nm de grosor y 3×10^{-4} mm de diámetro. Compare el número de partículas de óxido por centímetro cúbico con el de los átomos de solución sólida por centímetro cúbico, cuando al aluminio se le agrega un 3% en peso atómico de un elemento de aleación.

Sección 17-2 Compuestos particulados

17-13 ¿Qué es un compuesto particulado?

17-14 ¿Qué es un cermet? ¿Cuál es el papel del WC y Co en un cermet?

17-15 ¿En qué se convierte la regla de las mezclas en términos algebraicos cuando las fracciones volumétricas de las partes de un compuesto son idénticas ($f_1 = f_2 = \cdots = f_n$), pero la densidad varía?

17-16 Calcule la densidad de un carburo cementado, es decir, de un cermet, con base en una matriz de titanio si el compuesto contiene 50% en peso de WC, 22% en peso de TaC y 14% en peso de TiC. (Vea el ejemplo 17-2 para obtener las densidades de los carburos.)

17-17 Al caucho vulcanizado para neumáticos se le agregan partículas esféricas de sílice (100 nm de diámetro) para mejorar su rigidez. Si la densidad de la matriz de caucho vulcanizado es de 1.1 g/cm^3, la densidad de la sílice es de 2.5 g/cm^3 y el neumático tiene una porosidad de 4.5%, calcule el número de partículas de sílice perdidas cuando un neumático se desgasta hasta llegar a 0.4 cm de grosor. La densidad del neumático es 1.2 g/cm^3; su diámetro total es 63 cm y mide 10 cm de ancho.

17-18 Una rueda de esmeril común mide 22.5 cm de diámetro, 2.5 cm de grueso y pesa 2.7 kg. La rueda contiene SiC (densidad de 3.2 g/cm^3) unido por vidrio de sílice (densidad de 2.5 g/cm^3); 5% vol de la rueda es poroso. El SiC está en forma de cubos de 0.04 cm por lado. Calcule

a) la fracción volumétrica de partículas de SiC en la rueda, y

b) la cantidad de partículas de SiC que se han perdido de la rueda cuando ésta se ha desgastado a un diámetro de 20 cm.

17-19 Se produce material para un receptáculo eléctrico infiltrando cobre en un compacto poroso de carburo de tungsteno (WC). La densidad del compuesto es de 12.3 g/cm^3. Suponiendo que se llenan con cobre todos los poros, calcule

a) la fracción volumétrica de cobre en el compuesto,

b) la fracción volumétrica de poros en el material compacto de WC antes de la infiltración, y

c) la densidad original del compacto de WC antes de la infiltración.

17-20 Se produce un material para receptáculos eléctricos elaborando primero una pieza compacta de tungsteno poroso que pesa 125 g. Se introduce plata líquida en el compacto; una medición cuidadosa indica que se han infiltrado 105 g de plata. La densidad final del compuesto es de 13.8 g/cm^3. Calcule la fracción volumétrica del material compacto original que corresponde a porosidad interconectada, así como la fracción volumétrica de la porosidad cerrada (sin infiltración de plata).

17-21 ¿Cuánta arcilla deberá agregarse a 10 kg de polietileno para producir un compuesto de bajo costo, con un módulo de elasticidad superior a 827 MPa y una resistencia a la tensión mayor a 14 MPa? La densidad de la arcilla es de 2.4 g/cm^3 y la del polietileno es de 0.92 g/cm^3 (véase la figura 17-6).

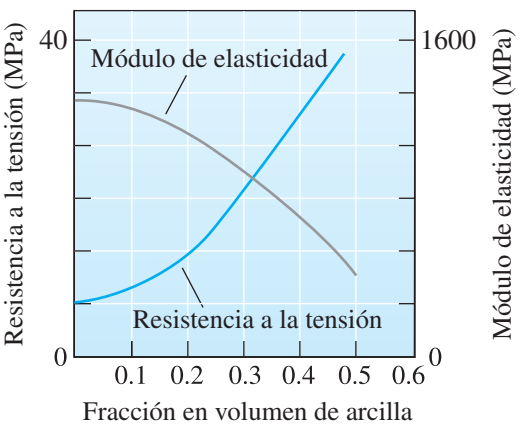


Figura 17-6 Efecto de la arcilla sobre las propiedades del polietileno. (Repetida para el problema 17-21.)

17-22 Se desea producir un componente de resina epóxica ligero para proporcionar aislamiento térmico. Hay disponibles cuentas o esferas huecas de vidrio con un diámetro exterior de 0.16 cm y con paredes de un grosor de 0.0025 cm. Determine el peso y el número de cuentas que deben agregarse a la resina epóxica para producir un compuesto de una libra con una densidad de 0.65 g/cm^3. La densidad del vidrio es de 2.5 g/cm^3 y la epóxica es de 1.25 g/cm^3.

Sección 17-3 Compuestos reforzados con fibras

Sección 17-4 Características de compuestos reforzados con fibras

17-23 ¿Qué es un compuesto reforzado con fibras?

17-24 ¿Qué materiales para refuerzo con fibras son de uso común?

17-25 En un compuesto reforzado por fibras, ¿cuál es el papel de la matriz?

17-26 ¿Qué significan los términos PRFC y PRFV?

17-27 Explique brevemente en qué forma los volúmenes de fibra, orientación y resistencia de la misma, así como su módulo, afectan las propiedades de los compuestos reforzados con fibras.

17-28 Determine el módulo elástico y la resistencia a la tensión en la dirección paralela a las fibras de un aluminio reforzado con Borsic para fibras con 25% de volumen. (Vea la figura 17-9.)

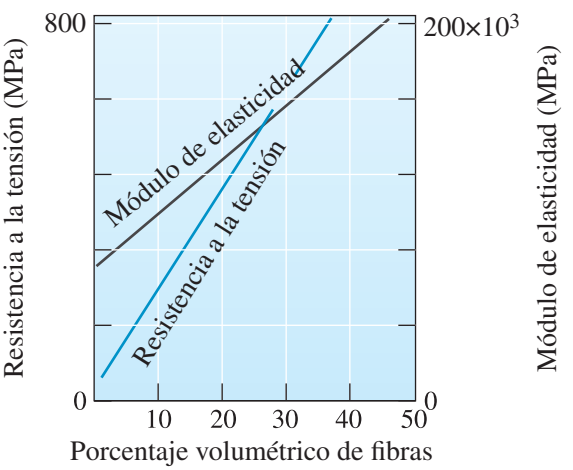


Figura 17-9 Influencia del porcentaje volumétrico de fibras de boro recubiertas de SiC (Borsic), sobre las propiedades del aluminio reforzado con Borsic, en la dirección paralela a las fibras. (Repetida para el problema 17-28.)

17-29 Cinco kilogramos de fibras continuas de boro se introducen en una orientación unidireccional en 8 kg de una matriz de aluminio. Calcule

a) la densidad del compuesto,

b) el módulo de elasticidad en dirección paralela a las fibras, y

c) el módulo de elasticidad en dirección perpendicular a las fibras.

17-30 Se desea producir 4.5 kg de un compuesto continuo y unidireccional reforzado con fibras, de carbono HS, en una matriz poliimida que tiene un módulo de elasticidad de por lo menos 172 $\times$ 10^3 MPa paralelo a las fibras. ¿Cuántas libras

de fibras son necesarias? Vea en el capítulo 16 las propiedades de la poliimida.

17-31 Nanotubos de carbono (NTC) con bajo peso (densidad 1.3 g/cm^3), alta resistencia a la tensión (50 GPa) y módulo de elasticidad (1 TPa) en la dirección axial han sido publicitados como el material más fuerte descubierto hasta ahora. Calcule la resistencia específica de los NTC. ¿Cómo se compara este valor con el de los bigotes de grafito dados en la tabla 17-2? Si un compuesto se elaboró usando una matriz de alúmina (Al_2O_3) con 1% vol de fibras de NTC, ¿qué fracción de la carga soportarían las fibras de NTC? En la práctica, los compuestos NTC de matriz cerámica no exhiben la esperada mejora en propiedades mecánicas. ¿Cuáles podrían ser algunas posibles razones de esto?

17-32 Una matriz epóxica está reforzada con 40% vol de fibras de vidrio E para producir un compuesto de 2 cm de diámetro que ha de soportar una carga de 25,000 N aplicada en forma paralela a la longitud de la fibra. Calcule el esfuerzo que actúa en cada fibra. El módulo elástico de la matriz epóxica es de 2.76×10^3 MPa.

17-33 Para fabricar una pieza de 454 kg para un vehículo espacial tripulado se usa una aleación de titanio con un módulo de elasticidad de 110×10^3 MPa. Determine el peso de una pieza que tenga el mismo módulo de elasticidad en dirección paralela a las fibras, si la pieza se fabrica de

a) aluminio reforzado con fibras de boro, y
b) poliéster (con módulo de 4482 MPa) reforzado con fibras de carbono de alto módulo.
c) Compare el módulo específico de los tres materiales.

17-34 En una matriz de nylon 6,6 se introducen fibras cortas, pero alineadas, de Al_2O_3 con un diámetro de 20 μm. La resistencia de la unión entre fibras y matriz se estima en 7 MPa. Calcule la longitud crítica de las fibras y compárela con el caso donde se usan bigotes de alúmina de 1 μm, en lugar de las fibras más gruesas. ¿Cuál es la proporción dimensional mínima para cada uno de los casos?

17-35 Se preparan varios compuestos de matriz epóxica utilizando diferentes longitudes de fibras de ZrO_2 de 3 μm de diámetro, y se encuentra que la resistencia del compuesto aumenta al incrementarse la longitud de las fibras hasta 5 mm. En fibras más largas, la resistencia se mantiene prácticamente sin cambio. Estime la resistencia de la unión entre las fibras y la matriz.

17-36 En una matriz de nylon 6,6 se introducen fibras de vidrio con diámetro de 50 μm. Determine la longitud crítica de fibras a la que la fibra se comporta como si fuera continua. La resistencia de la unión entre las fibras y la matriz es de 10 MPa. Las propiedades materiales relevantes son:

$E_{\text{vidrio}} = 72$ GPa, $E_{\text{nylon}} = 2.75$ GPa,
$TS_{\text{vidrio}} = 3.4$ GPa y $TS_{\text{nylon}} = 827$ MPa.

17-37 Un alambre bimetálico de cobre-plata, de 1 cm de diámetro, se prepara por medio de coextrusión con cobre como núcleo y plata como capa exterior. Las propiedades deseadas a lo largo del eje paralelo a la longitud del alambre bimetálico son:

a) Conductividad térmica > 410 W/(m · K);
b) Conductividad eléctrica > $60 \times 10^6\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, y
c) Peso < 750 g/m. Determine el intervalo permitido del diámetro del núcleo de cobre.

	Cobre	Plata
Densidad (g/cm^3)	8.96	10.49
Conductividad eléctrica ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)	59×10^6	63×10^6
Conductividad térmica [W/(m · K)]	401	429

17-38 Encuentre los materiales con los valores numéricos más altos para cada una de las siguientes seis propiedades en la tabla 17-2: *a*) densidad, *b*) resistencia a la tensión, *c*) módulo elástico, *d*) temperatura de fusión, *e*) módulo específico y *f*) resistencia específica. Como ejemplo, el tungsteno tiene la densidad más alta con 19.25 g/cm^3.

17-39 Si un compuesto reforzado con fibras tiene dos regiones separadas de fibras unidireccionales y se prueba como muestra la siguiente figura, ¿cuál sería la fórmula para calcular la resistencia a la tensión?

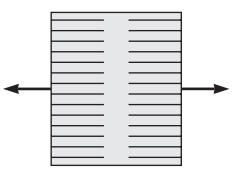


Figura 17-33 Orientación de las fibras en una matriz para el problema 17-39.

17-40 Elabore un diagrama con los siete puntos equidistantes de la curva de la figura 17-11 y encuentre la ecuación no polinomial que se ajuste a la línea con un valor de R^2 de por lo menos 0.900.

17-41 ¿Qué es un agente de acoplamiento? ¿Qué es "recubierta" en cuanto a la producción de fibras de vidrio se refiere?

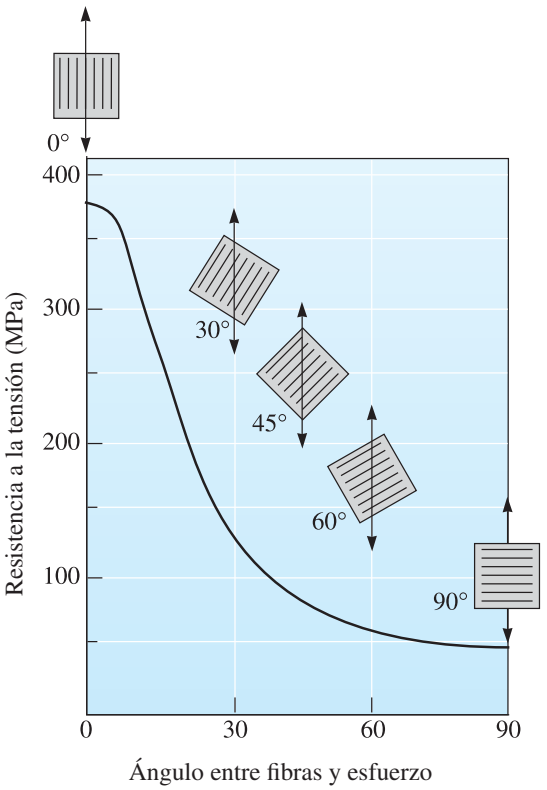


Figura 17-11 Efecto de la orientación de la fibra sobre la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzado con fibras de vidrio E. (Repetida para el problema 17-40.)

Sección 17-5 Manufactura de fibras y compuestos

17-42 Explique brevemente el método de fabricación de las fibras de boro y de carbono.

17-43 Explique brevemente cómo se fabrican las fibras de vidrio continuas.

17-44 ¿Cuál es la diferencia entre una fibra y un bigote?

17-45 En un compuesto de matriz polimérica se introducen directamente fibras de vidrio discontinuas, como fueron elaboradas, en la matriz; en un segundo caso, las fibras son previamente "recubiertas". Analice el efecto que podría tener esta diferencia sobre la longitud crítica de la fibra, así como sobre la resistencia del compuesto.

17-46 Explique la razón por la cual sería excelente la unión entre fibras de carbono y una matriz epóxica, en tanto que la unión entre las fibras de nitruro de silicio y una matriz de carburo de silicio sería mala.

17-47 Una matriz de poliimida ha de ser reforzada con 70% vol de fibras de carbono para obtener un módulo de elasticidad mínimo de 2.07×10^3 MPa. Recomiende un proceso para la producción de las fibras de carbono requeridas. Estime la resistencia a la tensión de las fibras que se producen.

17-48 Determine la proporción del área interseccional de la fibra al filamento en las imágenes de la figura 17-18.

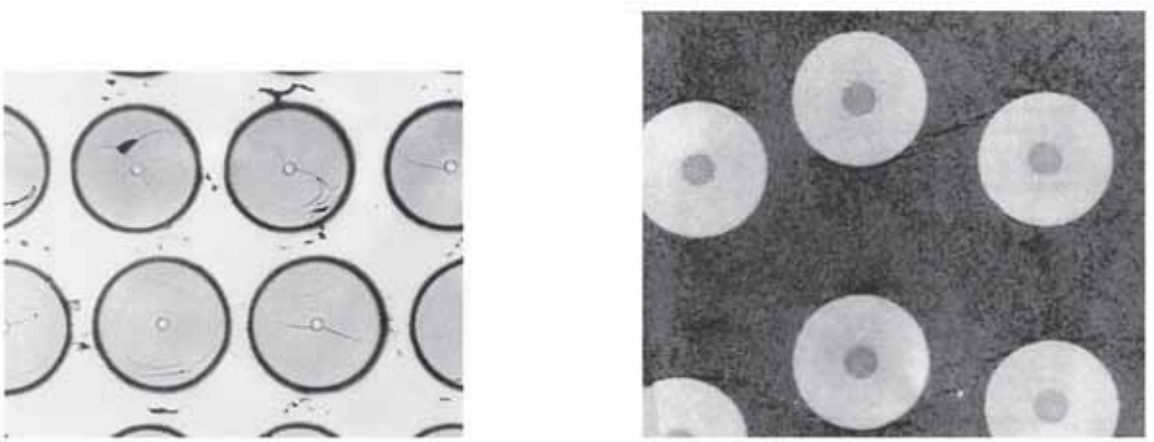


Figura 17-18 Micrografías de dos compuestos reforzados con fibra: *a*) aluminio reforzado con fibras de Borsic, con las fibras compuestas de una capa gruesa de boro depositada sobre un filamento de tungsteno de pequeño diámetro (1000 ×). (*Fuente: ASM Handbook, vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002. Reimpreso con autorización de ASM International. Todos los derechos reservados. www.asminternational.org*) *b*) En esta microestructura de un compuesto con matriz de cerámica y fibras cerámicas se usan fibras de carburo de silicio para reforzar una matriz de nitruro de silicio. La fibra SiC se deposita en forma de vapor en un pequeño filamento precursor de carbono (125 ×). (*Cortesía del Dr. R.T. Bhatt, NASA Lewis Research Center.*) *(Repetida para el problema 17-48.)*

Sección 17-6 Sistemas reforzados con fibra y sus aplicaciones

17-49 Explique brevemente en cuáles artículos deportivos se usan compuestos. ¿Cuál es la razón principal para el uso de estos compuestos en estas aplicaciones?

17-50 ¿Cuáles son las ventajas de utilizar compuestos de matriz cerámica?

17-51 Calcule las pendientes aparentes de mayor y menor profundidad de las líneas en la figura 17-26. Identifique los materiales a los que pertenecen.

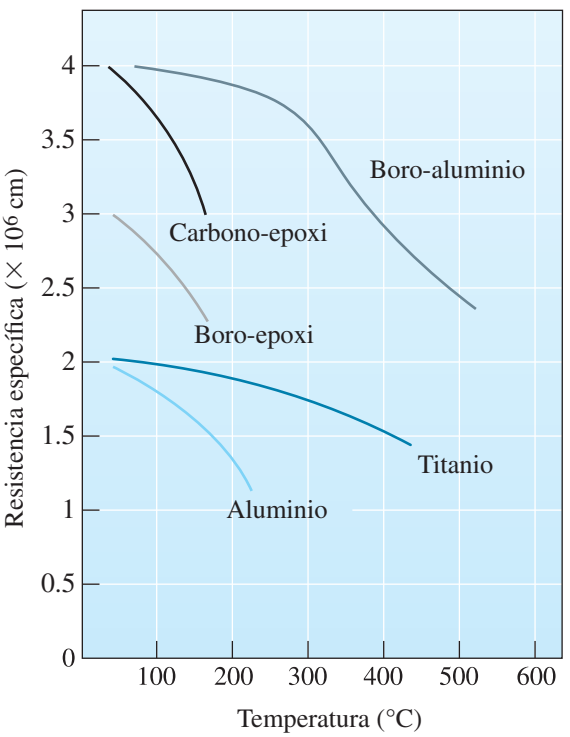


Figura 17-26 Gráfica de resistencia específica contra temperatura, para varios compuestos y metales. (Repetida para el problema 17-51.)

Sección 17-7 Materiales compuestos laminares

Sección 17-8 Ejemplos y aplicaciones de compuestos laminares

Sección 17-9 Estructuras tipo emparedado

17-52 ¿Qué es un compuesto laminar?

17-45 El Arall, un microlaminado, se produce usando cinco hojas de aluminio de 0.4 mm de espesor y cuatro hojas epóxicas de 0.2 mm de espesor, reforzadas con fibras de Kevlar^{MR} alineadas en forma unidireccional. La fracción volumétrica de las fibras de Kevlar^{MR} en estas hojas intermedias es de 55%. Calcule el módulo de elasticidad del microlaminado, en direcciones paralela y perpendicular a las fibras de Kevlar^{MR} alineadas unidireccionalmente. ¿Cuáles son las ventajas principales del material Arall en comparación con las del aluminio sin reforzar?

17-54 Se produce un laminado como material aislante, compuesto de aluminio de 0.1 mm de espesor y emparedado alrededor de una capa de 2 cm de espesor de espuma de poliestireno. Calcule la conductividad térmica del laminado en direcciones paralela y perpendicular a las capas. La conductividad térmica del aluminio es de $\frac{0.057\ \text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$ y la de la espuma es de $\frac{7.7 \times 10^{-5}\ \text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}$.

17-55 Una hoja de 0.01 cm de espesor de un polímero con un módulo de elasticidad de 4.8×10^3 MPa está emparedado entre dos hojas de vidrio de 4 mm de espesor con un módulo de elasticidad de 83×10^3 MPa. Calcule el módulo de elasticidad del compuesto en direcciones paralela y perpendicular a las hojas.

17-56 Una moneda estadounidense de 25 centavos tiene un diámetro de 2.3 cm, y aproximadamente 0.16 cm de espesor. El cobre cuesta alrededor de $2.43 por kilogramo, y el níquel cerca de $9.00 por kilogramo. Compare el costo del material en una moneda de compuesto contra el de una moneda fabricada totalmente de níquel.

17-57 Calcule la densidad de una estructura en panal formada por los elementos siguientes: las dos hojas de cierre de 2 mm de espesor se fabrican utilizando un material reforzado de matriz epóxica con 55% en volumen de fibras de vidrio E. El panal de aluminio tiene un ancho de 2 cm; las celdas tienen forma de cuadrados de 0.5 cm de lado y sus paredes tienen un espesor de 0.1 mm. La densidad del epoxi es de 1.25 g/cm^3. Compare el peso de un panel de 1 m × 2 m de este panal con un panel hecho de aluminio sólido de las mismas dimensiones.

Problemas de diseño

17-58 Diseñe los materiales y el procesamiento requeridos para producir un compuesto de fibra de vidrio reforzado con fibras discontinuas, pero alineadas, que servirá como cofre de un automóvil deportivo. El compuesto debe dar una densidad de menos de 1.6 g/cm^3 y una resistencia de 138 MPa. Asegúrese de elaborar una lista de todas las hipótesis que usted haga para la creación de su diseño.

17-59 Diseñe un material para receptáculos eléctricos, así como un método para su producción, que resulte en una densidad no superior a 6 g/cm^3 y

que, sin embargo, por lo menos 50% en volumen del mismo sea conductor.

17-60 ¿Qué factores deberán considerarse para el diseño de la estructura de una bicicleta, utilizando aluminio y un compuesto C-C?

Problemas por computadora

17-61 *Propiedades de compuestos laminares*. Edite un programa de cómputo (o use una hoja de cálculo) para calcular las propiedades de un compuesto laminar. Por ejemplo, si el usuario proporciona el valor de la conductividad térmica de cada fase y la fracción volumétrica correspondiente, el programa debe dar el valor de la conductividad térmica efectiva. Deberán calcularse las propiedades en direcciones paralela y perpendicular a las laminillas.

Problemas Knovel[MR]

K17-1 Usando la regla de las mezclas, calcule la densidad del polipropileno que contenga 30% vol de relleno de talco. Compare la densidad calculada con la densidad común para este compuesto y explique la discrepancia, si la hay. Suponga que el polipropileno tiene una cristalinidad de 40-50%.

Los materiales de construcción, por ejemplo acero, concreto, madera, vidrios, etc., al igual que materiales compuestos como la fibra de vidrio y otros, desempeñan un papel determinante en el desarrollo y la conservación de la infraestructura de un país. Aun cuando muchos de los actuales materiales de construcción están perfeccionados y las tecnologías para producirlos están plenamente desarrolladas, es posible ver nuevos avances en tales materiales. El uso de sensores y activadores inteligentes, que pueden ayudar a controlar estructuras u observar de manera continua el estado de estructuras, es uno de estos campos de actividad. El creciente uso de materiales compuestos y adhesivos poliméricos es una dimensión más que ha avanzado de manera considerable. Procesos como la soldadura y la galvanización, así como fenómenos como la corrosión, desempeñan papeles importantes en la confiabilidad y durabilidad de las estructuras. (*Martin Puddy/Stone/Getty Images*).

CAPÍTULO

18

Materiales de construcción

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Cuáles son los materiales de construcción manufacturados de más uso?*
- *¿Cuál es la diferencia entre el cemento y el concreto?*
- *¿Cuál de los materiales de construcción es un material compuesto existente en la naturaleza?*
- *¿Qué es el concreto reforzado?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Describir la estructura de la madera y sus componentes.
- Calcular la densidad de la madera en función de su contenido de agua.
- Calcular la expansión y contracción de la madera en función de su contenido de agua.
- Diseñar la mezcla de concreto necesaria para obtener las propiedades deseadas.
- Diferenciar entre mortero, cemento, concreto y asfalto.

En la construcción de edificios, supercarreteras, puentes y una gran parte de la infraestructura de cualquier país se han empleado diversos materiales. En este capítulo se verán tres de los más importantes: la madera, el concreto y el asfalto. El campo de los materiales de construcción es de gran importancia para los ingenieros, en especial ingenieros civiles y los que trabajan en la construcción de carreteras. Las propiedades y el procesamiento de los aceros que se usan para la elaboración del concreto reforzado, los materiales cerámicos (por ejemplo, arena, cal y concreto), los plásticos (por ejemplo, los epóxicos y las espumas de poliestireno), los vidrios y compuestos (por ejemplo, la fibra de vidrio) desempeñan un destacado papel en el desarrollo y uso de materiales de construcción. Otro campo de actividad en la ingeniería civil cuya importancia es cada vez mayor está relacionado con el uso de sensores y activadores en edificios y puentes. Aquí desempeñan un papel sobresaliente los materiales avanzados, desarrollados para aplicaciones microelectrónicas y ópticas.

Por ejemplo, hoy se construyen puentes y edificios inteligentes equipados con sensores de fibra óptica. Estos sensores pueden vigilar continuamente las condiciones físicas

de estructuras, pudiendo así emitir avisos oportunos sobre cualquier problema potencial. De manera similar, investigadores en estructuras inteligentes también están trabajando en muchas otras ideas, utilizando sensores que pueden detectar fenómenos como la acumulación de hielo. Si se detecta hielo, el sistema puede poner en marcha un rociado de agua salada para impedir o retrasar la congelación. Existen también sensores de diseño avanzado que detectan nieve o hielo; se usan en rampas para cocheras muy inclinadas en estacionamientos comerciales donde, al activarse el sensor de nieve-hielo, se inicia la calefacción de esa sección de rampa. Asimismo, ya existen muchos recubrimientos inteligentes para vidrios, los cuales pueden desviar el calor y hacer que los edificios sean eficientes en el consumo de energía.

También se encuentran nuevos recubrimientos que hacen que los vidrios se limpien por sí solos. Y se están implementando nuevas tecnologías para desarrollar "edificios ecológicos".

Existen muchas otras áreas de materiales que se relacionan con estructuras. Por ejemplo, la corrosión y las limitaciones que ésta impone sobre la vida útil esperada de los puentes es un costo de primer orden en cualquier país. Las estrategias que emplean aceros galvanizados, así como las pinturas apropiadas para la protección contra la corrosión, desempeñan ahora un papel importantísimo en el diseño de puentes. Del mismo modo, muchas técnicas de unión de materiales, como la soldadura, tienen también una función preponderante en la construcción de puentes y edificios. Deben tomarse en consideración los impactos ambientales a largo plazo de los materiales utilizados. Por ejemplo, ¿cuáles son los mejores materiales para usarse en tuberías de agua, en aislamientos, en retardadores de fuego, etc.? El objetivo de este capítulo es presentar un resumen de las propiedades de la madera, del concreto y del asfalto.

18-1 Estructura de la madera

La madera, material compuesto de origen natural, es uno de los materiales más comunes. A pesar de que no se trata de un material de "alta tecnología", estamos prácticamente rodeados de madera en nuestros hogares, y la valoramos por su belleza y durabilidad. Además, es un material resistente y ligero que sigue predominando en gran parte de la industria de la construcción.

La madera puede considerarse como un material compuesto complejo, reforzado con fibras y formado de células poliméricas largas, tubulares y alineadas en una dirección dentro de una matriz polimérica. Además, los tubos poliméricos están formados por paquetes de fibras de celulosa parcialmente cristalina, alineados en varias direcciones en relación con el eje de los tubos. Esta disposición brinda excelentes propiedades a la tensión en la dirección longitudinal.

La madera está formada por cuatro constituyentes principales. Las fibras de **celulosa** representan más o menos de 40 a 50% de la madera. La celulosa es un polímero termoplástico de origen natural con un grado de polimerización de alrededor de 10,000. En la figura 18-1 se muestra la estructura de la celulosa. Aproximadamente de 25 a 35% de un árbol es **hemicelulosa**, polímero con un grado de polimerización de alrededor de 200. Otro 20 a 30% de un árbol es la **lignina**, cemento orgánico de bajo peso molecular que une los diversos constituyentes de la madera. Por último, los **extractivos** son impurezas orgánicas como aceites que le dan color a la madera o que actúan como preservadores contra el entorno y los insectos, así como minerales orgánicos como la sílice, que es un factor que desafila las hojas de las sierras durante el corte de la madera. Los extractivos pueden representar hasta 10% del total de la madera.

Existen tres niveles importantes en la estructura de la madera: la estructura fibrosa, la estructura de celdas y la macroestructura (figura 18-2).

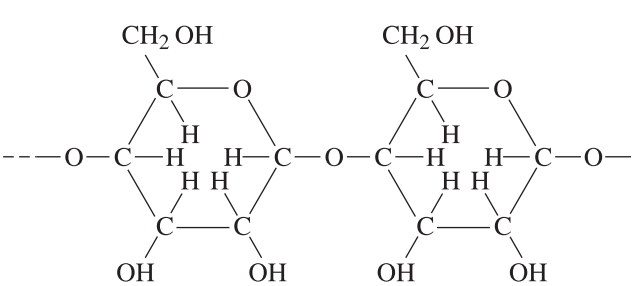


Figura 18-1 Estructura de los filamentos de celulosa en la madera.

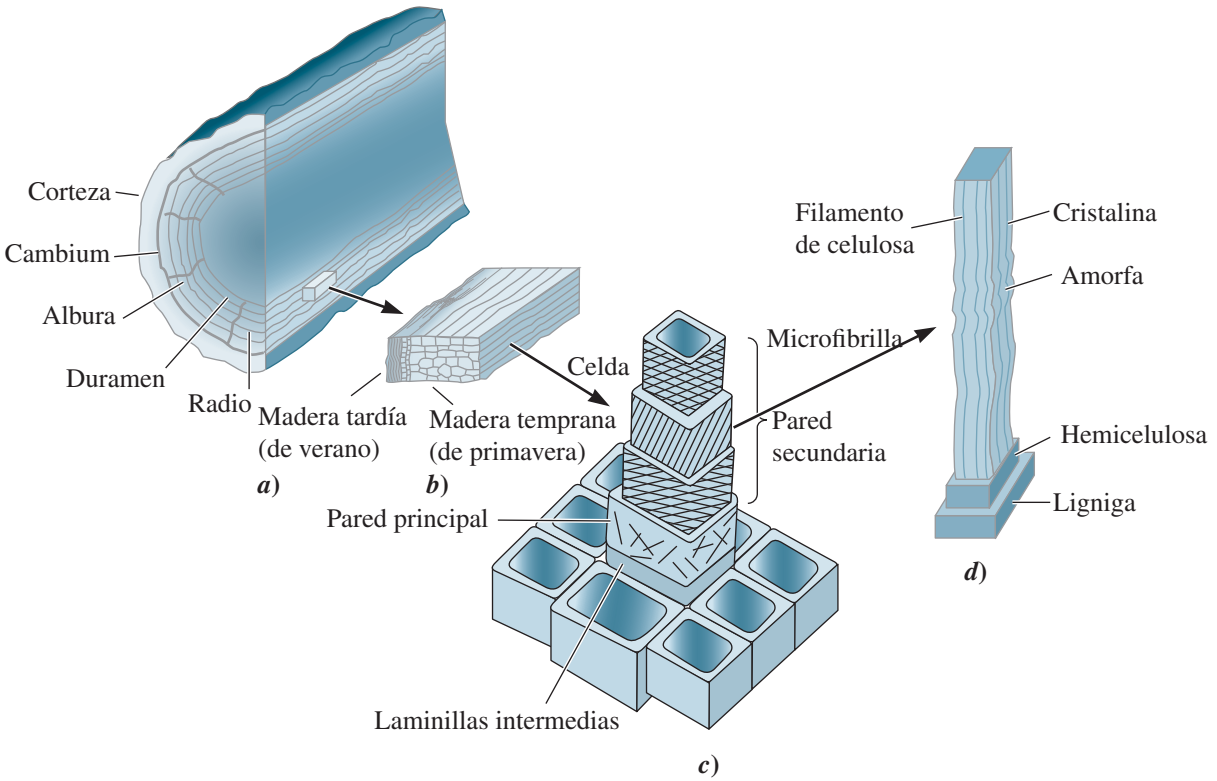


Figura 18-2 Estructura de la madera: *a*) macroestructura, que incluye una estructura en capas "bordeada" por anillos de crecimiento anual, *b*) detalle de la estructura de la celda dentro de un anillo de crecimiento anual, *c*) estructura de una celda, que incluye varias capas formadas por microfibrillas de fibras celulósicas, de fibras de hemicelulosa y de lignina, y *d*) cadenas de celulosa alineadas, parcialmente cristalinas, existentes en la microfibrilla.

Estructura fibrosa

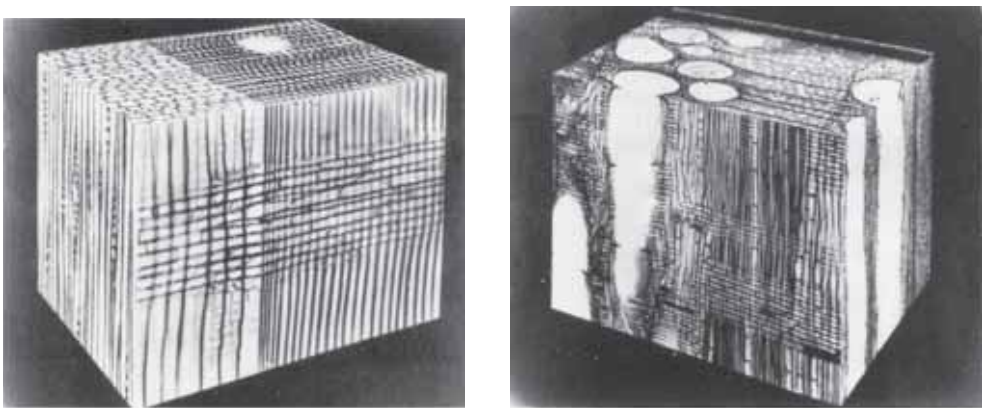
El componente básico de la madera es la celulosa, $C_6H_{10}O_5$, organizada en cadenas poliméricas que forman largas fibras. Gran parte de la longitud de las fibras es cristalina, con las regiones cristalinas separadas por pequeños tramos de celulosa amorfa. Un paquete de cadenas de celulosa está recubierto por una capa de cadenas de hemicelulosa amorfa, con cadenas aleatoriamente orientadas. Por último, la hemicelulosa está cubierta de lignina [figura 18-2*d*)]. Todo el paquete formado por cadenas de celulosa, cadenas de hemicelulosa y lignina se conoce como **microfibrilla**; ésta puede alcanzar una longitud prácticamente infinita.

Estructura de las celdas

Un árbol está compuesto de celdas alargadas, con frecuencia con una proporción dimensional de 100 o mayor, y que constituyen alrededor del 95% del material sólido de la madera. Las células huecas están formadas por varias capas construidas a partir de las microfibrillas [figura 18-2*c*)]. La primera pared, o pared principal de la celda, contiene microfibrillas de orientación aleatoria. Conforme la pared de la celda se hace más gruesa, se forman tres capas adicionales distintas. Las paredes exterior e interior contienen microfibrillas orientadas en dos direcciones no paralelas a la celda. La pared intermedia, que es la de mayor espesor, contiene microfibrillas alineadas en una sola dirección, por lo general formando un ángulo no paralelo al eje de la celda.

Macroestructura

Un árbol está formado por varias capas [figura 18-2*a*)]. La capa exterior, o *corteza*, protege al árbol. El **cambium**, justo por debajo de la corteza, contiene celdas de crecimiento nuevas. La **albura** contiene algunas celdas vivas huecas que almacenan nutrientes y sirven como conducto para el agua. Por último, el **duramen**, que sólo contiene celdas muertas, proporciona la mayor parte del soporte mecánico para el árbol.



a) *b*)

Figura 18-3 Estructura celular en *a*) madera blanda (*Fuente: J.M. Dinwoodie,* Wood: Nature's Cellular Polymeric Fiber-Composite*, The Institute of Metals. Con autorización de Maney Publishing*) y *b*) madera dura. Las maderas blandas contienen celdas más grandes y largas que las duras. Sin embargo, estas últimas contienen vasos de gran diámetro. El agua se transporta por las celdas en las maderas blancas; en las duras, por los vasos. (*Fuente: J. M. Dinwoodie,* Wood: Nature's Cellular Polymeric Fiber-Composite, *The Institute of Metals. Con autorización de Maney Publishing*).

El árbol crece cuando se desarrollan nuevas celdas alargadas en el cambium. Al principio de la estación de crecimiento, las celdas son grandes; posteriormente, tienen un diámetro menor, paredes más gruesas y una densidad más alta. Esta diferencia entre madera temprana (de *primavera*) y madera tardía (de *verano*) permite observar los anillos de crecimiento anual [figura 18-2*b*)]. Además, algunas celdas crecen en dirección radial; estas células, o *radios*, proporcionan transporte y almacenamiento de alimento.

Maderas duras en comparación con maderas blandas

Las maderas duras provienen de árboles de hoja caduca, como roble, fresno, nogal americano, olmo, haya, abedul, nogal y arce. En estos árboles, las celdas alargadas son relativamente cortas, con un diámetro de menos de 0.1 mm y una longitud de menos de 1 mm. Dentro de la madera existen poros longitudinales, o vasos, que transportan el agua por todo el árbol (figura 18-3).

Las maderas blandas son las coníferas, árboles perennes como el pino, el abeto rojo, el pinabete, el abeto blanco y el cedro, que tienen estructuras similares. En las maderas blandas las celdas tienden a ser algo más largas que en las maderas duras. El centro hueco de las celdas es el responsable de transportar el agua. En general, la densidad de las maderas blandas tiende a ser inferior a la de las maderas duras, debido a un mayor porcentaje de espacios huecos.

18-2 Contenido de humedad y densidad de la madera

El material con el que están constituidas las celdas individuales en prácticamente todas las maderas tiene en esencia la misma densidad, alrededor de 1.45 g/cm^3. Sin embargo, la madera contiene espacios huecos que hacen que la densidad real sea muy inferior. La densidad de la madera depende principalmente de la especie del árbol (o de la cantidad de espacios vacíos peculiares de dicha especie) y del porcentaje de agua presente en la madera (que depende del grado de secado y de la humedad relativa a la cual se vea expuesta la madera durante su uso). Una madera seca por completo varía en densidad de 0.3 a 0.8 g/cm^3; las maderas duras tienen densidades más altas que las blandas. Pero la densidad medida es más alta, por lo general, debido al agua contenida en la madera. El porcentaje de agua está dado por

$$\%\ \text{de agua} = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso de la madera seca}} \times 100 \qquad (18\text{-}1)$$

Tabla 18-1 Propiedades de maderas comunes

Madera	Densidad (para 12% de agua) (g/cm^3)	Módulo de elasticidad (MPa)
Cedro	0.32	7600
Pino	0.35	8300
Abeto	0.48	13800
Arce	0.48	10350
Abedul	0.62	13800
Roble	0.68	12400

Con base en esta definición, es posible describir una madera que contenga más de 100% de agua. El agua está tanto en las celdas huecas como en los vasos, donde no está retenida con firmeza, y en la estructura celulósica de las paredes de la celda, donde está más fuertemente unida a las fibras de la celulosa. Aun cuando en un árbol vivo se almacena gran cantidad de agua, la cantidad de agua en la madera después de cortar el árbol dependerá, por último, de la humedad a la cual la madera está expuesta; una humedad más alta incrementa la cantidad de agua en las paredes de las celdas. La densidad de la madera está dada por lo general a un contenido de humedad de 12%, lo que corresponde a 65% de humedad. En la tabla 18-1 aparecen la densidad y el módulo de elasticidad en dirección paralela al grano de varias maderas comunes para este contenido normal de agua.

El siguiente ejemplo ilustra el cálculo de la densidad de la madera.

Ejemplo 18-1 *Densidad de madera seca y húmeda*

Una madera verde tiene una densidad de 0.86 g/cm^3 y contiene 175% de agua. Calcule la densidad de la madera totalmente seca.

SOLUCIÓN

Una muestra de 100 cm^3 de la madera debe pesar 86 g. A partir de la ecuación 18-1, se puede determinar que el peso (en este caso, la masa) de la madera seca es

$$\%\text{ de agua} = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso de la madera seca}} \times 100 = 175$$

$$= \frac{\text{peso de madera verde} - \text{peso de madera seca}}{\text{peso de madera seca}} \times 100 = 175$$

Despejando el peso en seco de la madera:

$$\text{Peso de la madera seca} = \frac{(100)(\text{peso de la madera verde})}{275}$$

$$= \frac{(100)(86)}{275} = 31.3\,\text{g}$$

$$\text{Densidad de madera seca} = \frac{31.3\,\text{g}}{100\,\text{cm}^3} = 0.313\,\text{g/cm}^3$$

18-3 Propiedades mecánicas de la madera

La resistencia de la madera depende de su densidad, la cual, a su vez, depende tanto del contenido de agua como del tipo de madera. Conforme la madera se seca, primero se elimina el agua de los vasos y después de las paredes de las celdas. Si se elimina el agua de los vasos, no se observa prácticamente ningún cambio en la resistencia o rigidez de la madera (figura 18-4). Si el proceso de secado continúa hasta menos de alrededor del 30% de agua, hay pérdida de agua de las fibras de celulosa propiamente dichas. Esta pérdida hace posible que las fibras individuales se acerquen unas a otras, lo que incrementa la unión entre las fibras, así como la densidad de la madera y, por lo tanto, incrementa la resistencia y la rigidez de la misma.

El tipo de madera también afecta la densidad. Dado que tienen una menor cantidad de madera tardía de densidad más alta, las maderas blandas normalmente son menos densas y, por lo tanto, tienen resistencias inferiores que las maderas duras. Además, las celdas en las maderas blandas son más grandes, más largas y abiertas que las de las maderas duras, lo que también resulta en una densidad menor.

Las propiedades mecánicas de la madera son altamente anisotrópicas. En la dirección longitudinal (figura 18-5), una carga de tensión aplicada actúa en dirección paralela a las microfibrillas y a las cadenas celulósicas en la sección media de la pared secundaria. Estas cadenas son resistentes, puesto que en su mayor parte son cristalinas y pueden soportar una carga relativamente alta. Sin embargo, en las direcciones radial y tangencial, las débiles uniones entre las microfibrillas y las fibras celulósicas se pueden romper, lo que resulta en propiedades de tensión muy bajas. Un comportamiento similar se observa en cargas de compresión y de flexión. Debido a su comportamiento anisotrópico, la mayor parte de las maderas se corta en forma tangencial-longitudinal o radial longitudinal. Este tipo de corte maximiza el comportamiento longitudinal de la madera.

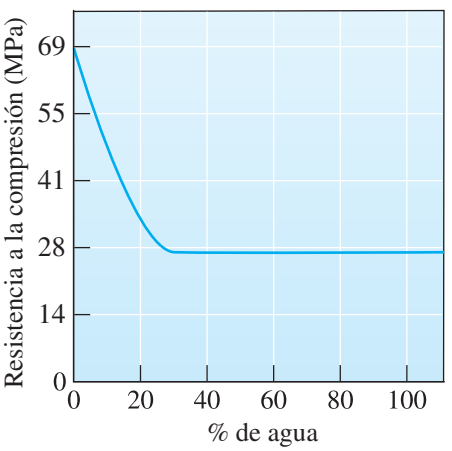


Figura 18-4 Efecto del porcentaje de agua de una madera común en la resistencia a la compresión en dirección paralela al grano

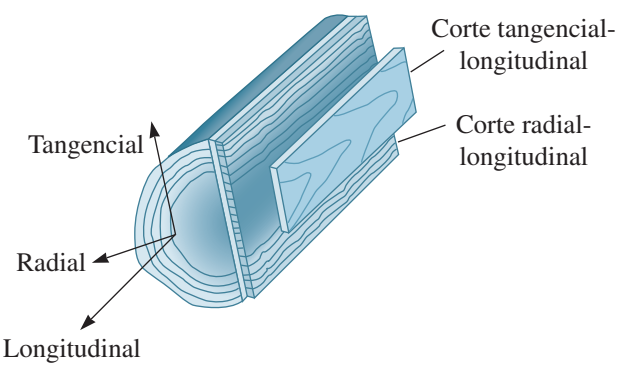


Figura 18-5 Diferentes direcciones en un leño. La madera tiene un comportamiento anisotrópico debido a diferencias en la orientación de las celdas y del grano.

La madera limpia tiene propiedades deficientes a la compresión y la flexión (lo que produce una combinación de fuerzas de compresión y de tensión). A compresión, las fibras de las celdas tienden a pandearse, originando la deformación de la madera y su ruptura a bajos esfuerzos. Desafortunadamente, la mayoría de las aplicaciones para la madera someten al componente a compresión o a flexión y, por consiguiente, no aprovechan por completo las propiedades de ingeniería del material. De igual manera, el módulo de elasticidad es bastante anisotrópico; el módulo perpendicular al grano es alrededor de 1/20 del que aparece en la tabla 18-1 para orientaciones paralelas al grano. La tabla 18-2 compara las resistencias a la tensión y a la compresión, tanto paralela como perpendicular a las celdas, para varias maderas.

La madera de primera, sin nudos u otras imperfecciones, tiene una resistencia y un módulo específicos que se comparan bien con los de otros materiales comunes para la construcción (tabla 18-3). La madera también tiene una buena tenacidad, principalmente debido a la ligera desorientación de las fibras de celulosa en la capa intermedia de la pared secundaria. Bajo carga, las fibras se enderezan, lo que permite cierto grado de ductilidad y absorción de energía. Las propiedades mecánicas de la madera también dependen de las imperfecciones que contenga. La madera de primera puede tener una resistencia a la tensión longitudinal de 69 a 138 MPa. La madera de construcción de menor calidad y costo, que por lo general presenta numerosos defectos, puede tener una resistencia a la tensión menor de 34 MPa. Los nudos desordenan el grano de la madera en su cercanía, haciendo que las celdas se orienten en forma perpendicular a la carga a la tensión.

Tabla 18-2 Comportamiento anisotrópico de diversas maderas (al 12% de humedad)

	Resistencia a la tensión longitudinal (MPa)	Resistencia a la tensión radial (MPa)	Resistencia a la compresión longitudinal (MPa)	Resistencia a la compresión radial (MPa)
Haya	86	7	50	7
Olmo	121	4.6	38	4.8
Arce	108	8	54	10
Roble	78	6.5	43	6
Cedro	46	2.2	42	6.3
Abeto	78	2.7	37.6	4.2
Pino	73	2.1	33	3
Picea	59	2.6	39	4

Tabla 18-3 omparación de la resistencia y el módulo específicos de la madera con los otros materiales de construcción comunes

Material	Resistencia específica ($\times 10^5$ cm)	Módulo específico ($\times 10^7$ cm)
Madera de primera	17.5	23.8
Aluminio	12.5	26.3
Acero 1020	5	26.3
Cobre	3.8	13.8
Concreto	1.5	8.8

Basado en F.F. Wangaard, "Wood: Its Structure and Properties", J. Educ. Models for Mat. Sci. and Engr., *vol. 3, núm. 3, 1979.*

18-4 Expansión y contracción de la madera

Al igual que otros materiales, la madera cambia de dimensiones al calentarse o enfriarse. Los cambios dimensionales en la dirección longitudinal son muy pequeños en comparación con los de metales, polímeros y materiales cerámicos, pero los cambios dimensionales en las direcciones radial y tangencial son más grandes que los de la mayoría de los otros materiales.

Además de los cambios dimensionales provocados por las fluctuaciones en la temperatura, el contenido de humedad en la madera provoca cambios significativos en las dimensiones. De nuevo, los cambios de mayor importancia se presentan en las direcciones radial y tangencial, donde el contenido de humedad afecta el espaciamiento entre las cadenas celulósicas en las microfibrillas. El cambio en dimensión Δx en las direcciones radial y tangencial se puede aproximar con

$$\Delta x = x_0[c(M_f - M_i)] \tag{18-2}$$

donde x_0 es la dimensión inicial, M_i es el contenido inicial de agua, M_f es el contenido final de agua y c es el coeficiente que describe el cambio dimensional que se puede medir, ya sea en la dirección radial o en la tangencial. La tabla 18-4 incluye los coeficientes dimensionales para varias maderas. En la dirección longitudinal no se observan cambios superiores a 0.1 o 0.2%.

Durante el secado inicial de la madera, los grandes cambios dimensionales en la dirección perpendicular a las celdas provocan torceduras e incluso grietas. Además, al utilizarse la madera, su contenido de humedad puede cambiar dependiendo de la humedad relativa del entorno. Puesto que durante el uso la madera adquiere o pierde agua, seguirá presentándose contracción o hinchazón. Si una construcción de madera no permite cierto movimiento causado por las fluctuaciones en la humedad, pueden presentarse pandeos o agrietamientos, situación particularmente severa en aplicaciones en las cuales hay grandes extensiones de madera, como el piso de una habitación de gran tamaño. Una expansión excesiva puede provocar grandes combas en el piso; una contracción demasiado grande puede provocar grandes espacios entre los tablones del piso.

18-5 Madera contrachapada (triplay)

El comportamiento anisotrópico de la madera puede reducirse, y se pueden fabricar productos de madera en tamaños más grandes usando madera contrachapada. A partir de troncos, normalmente de madera blanda, se cortan hojas delgadas conocidas como **capas**. Estas capas se apilan unas sobre otras con los granos entre capas adyacentes orientados a 90° entre sí; por lo general, se utiliza un número impar de capas. Es importante cerciorarse de que estos ángulos resulten lo más preciso posible para asegurar que la madera contrachapada no se torcerá o pandeará al variar el contenido de humedad de la misma. Las capas individuales por lo general se unen entre sí mediante una resina fenólica termoestable. La resina se introduce entre las capas, que después se someten a presión mientras están calientes para hacer que la resina se polimerice.

También se fabrican productos de madera de tipo similar en forma de materiales compuestos "laminares". Las capas visibles pueden ser de madera dura costosa y las centrales de una madera blanda menos costosa. Se pueden compactar partículas de madera en forma de hojas y laminares

Tabla 18.4 Coeficiente dimensional c [cm/(cm·% H_2O)] para varias maderas

Madera	Radial	Tangencial
Haya	0.00190	0.00431
Olmo	0.00144	0.00338
Arce	0.00165	0.00353
Roble	0.00183	0.00462
Cedro	0.00111	0.00234
Abeto	0.00155	0.00278
Pino	0.00141	0.00259
Picea	0.00148	0.00263

entre dos capas de madera para producir hojas de aglomerado. Las capas de madera se pueden usar como caras para materiales con estructura en panal.

18-6 Materiales de concreto

Un **agregado** es una combinación de grava, arena, piedra triturada o escoria. La escoria es un subproducto de la refinación de los minerales. El **mortero** se hace mezclando cemento, agua, aire y un agregado fino. El concreto contiene todos los ingredientes del mortero más los agregados gruesos. Los **cementos** son materiales inorgánicos que se aplican y endurecen después de ser mezclados, para formar una pasta usando agua. El **concreto** es un material compuesto de partículas separadas en el cual tanto los agregados como la matriz son materiales cerámicos. En el concreto, la arena y un agregado grueso se unen en una matriz de **cemento Portland**. Una reacción de cementación que ocurre entre el agua y los minerales del cemento proporciona una matriz resistente que mantiene a los agregados en su sitio y le aporta al concreto una buena resistencia a la compresión.

Cementos

Se clasifican como hidráulicos y no hidráulicos. Los **cementos hidráulicos** fraguan y se endurecen en presencia de agua. Los **cementos no hidráulicos** (por ejemplo, la cal, CaO) no pueden endurecerse en el agua y necesitan aire para su endurecimiento. El cemento Portland es el material fabricado de mayor uso en la construcción. Fue patentado por Joseph Aspdin en 1824 y se llama así por los acantilados de piedra caliza de la isla de Portland, en Inglaterra.

El cemento hidráulico se fabrica a partir de silicatos de calcio, con una composición aproximada de CaO (~60 a 65%), SiO_2 (~20 a 25%) y óxido de hierro y alúmina (~7 a 12%). El aglutinado del cemento, que es de partículas muy pequeñas, está compuesto de varias proporciones de $3CaO \cdot Al_2O_3$, $2CaO \cdot SiO_2$, $3CaO \cdot SiO_2$, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, y otros minerales. En terminología del cemento, a veces CaO, SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3 se conocen como *C*, *S*, *A* y *F*, respectivamente. Por ello, C_3S significa $3CaO\text{-}SiO_2$. Cuando se le agrega agua al cemento, ocurre una reacción de hidratación que produce un gel sólido que une las partículas de agregados. Las reacciones posibles incluyen

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3\ Ca_3A_{l2}(OH)_{12} + \text{calor}$$
$$3CaO + SiO_2 + (x + 1)H_2O \rightarrow Ca_2SiO_4 \cdot xH_2O + Ca(OH)_2 + \text{calor}$$

Después de la hidratación, el cemento proporciona la unión para las partículas de agregados. En consecuencia, debe adicionarse suficiente cemento para recubrir todas las partículas de agregados. A menudo el cemento constituye alrededor de 15% volumétrico de los sólidos dentro del concreto.

La composición del cemento ayuda a determinar la rapidez del fraguado y las propiedades finales del concreto, como se muestra en la figura 18-6. En general, se espera que el concreto fragüe totalmente en un plazo de 28 días (figura 18-7), aun cuando un poco de fraguado adicional puede continuar durante años.

Existen alrededor de 10 tipos generales de cementos. Algunos aparecen en la tabla 18-5. En estructuras grandes, como las cortinas de presas, el fraguado debe ser lento para evitar un calenta-

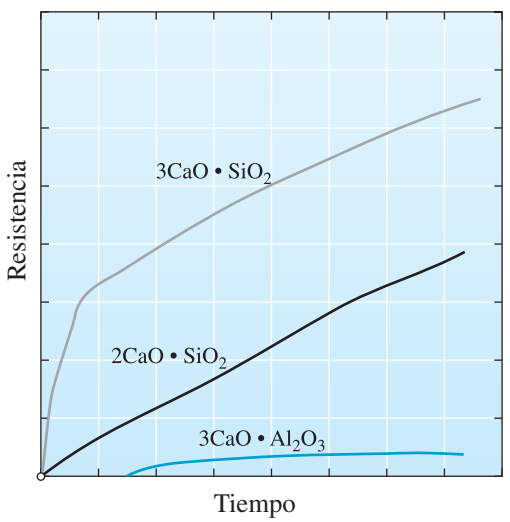


Figura 18-6 Rapidez de hidratación de los minerales en el cemento Portland. (*Basado en Lea*, Chemistry of Cement and Concrete, *Elsevier, 2003.*)

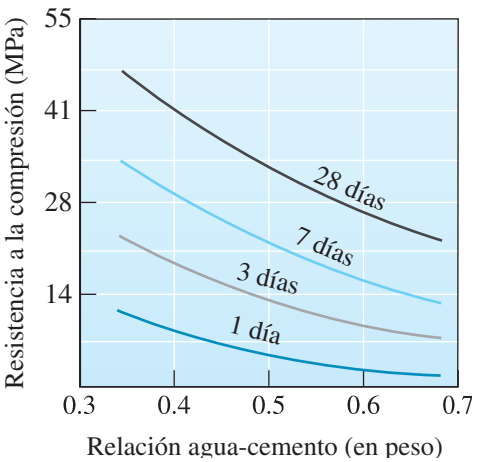


Figura 18-7 La resistencia del concreto a la compresión aumenta conforme pasa el tiempo. Después de 28 días, el concreto prácticamente ha alcanzado su máxima resistencia.

Tabla 18-5 Tipos de cementos Portland

	Composición aproximada				
	3C · S	**2C · S**	**3C · A**	**4C · A · F**	**Características**
Tipo I	55	20	12	9	Propósito general
Tipo II	45	30	7	12	Baja generación de calor, resistencia moderada a los sulfatos
Tipo III	65	10	12	8	Fraguado rápido
Tipo IV	25	50	5	13	Muy baja generación de calor
Tipo V	40	35	3	14	Buena resistencia a sulfatos

miento excesivo provocado por la reacción de hidratación. Estos cementos por lo general contienen bajos porcentajes de $3Ca \cdot SiO_2$, como en los cementos tipo II y IV. Sin embargo, algunos trabajos de construcción requieren que los encofrados o cimbras sean retirados y vueltos a usar tan rápido como sea posible; los cementos para estos fines pueden contener grandes cantidades de $3CaO \cdot SiO_2$, como en los del tipo III.

La composición del cemento también afecta la resistencia del concreto al ambiente. Por ejemplo, los sulfatos existentes en el suelo pueden atacar al concreto; proporciones más altas de $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ y $2CaO \cdot SiO_2$ ayudan a producir concretos más resistentes al sulfato, como en el tipo V.

Arena

Desde el punto de vista químico, la arena es principalmente sílice (SiO_2). Las arenas son minerales finos, por lo general con un espesor del orden de 0.1 a 1.0 mm de diámetro. Con frecuencia contienen al menos cierta cantidad de agua absorbida, que debe considerarse al preparar una mezcla de concreto. La arena ayuda a llenar los huecos entre agregados más gruesos, lo que proporciona un alto factor de empaquetamiento, reduce la cantidad de porosidad abierta (o interconectada) en el concreto terminado y los problemas de desintegración del concreto debido a congelamiento y descongelamiento repetidos durante su vida de servicio.

Agregados

Los agregados gruesos están compuestos de grava y piedra. Deben ser limpios, resistentes y durables. Las partículas de agregados que tienen forma angular redonda proporcionan resistencia debido al entrelazamiento mecánico entre las mismas, pero las partículas angulares también presentan una mayor superficie en la cual se pueden formar huecos o grietas. Por lo general se prefiere que el tamaño de los agregados sea grande, condición que también reduce al mínimo el área de la superficie en la que pueden formarse grietas o huecos. El tamaño del agregado deberá corresponder con el tamaño de la estructura que se construya; las partículas de agregados no deben ser mayores a 20% del grosor de la estructura.

En algunos casos se pueden usar agregados especiales. Es posible preparar concretos ligeros usando escorias minerales producidas durante operaciones siderúrgicas, ya que contienen un mejor

Tabla 18-6 Características de materiales para concreto

Material	Densidad real	
Cemento	3 g/cm^3	1 saco = 42.6 kg
Arena	2.6 g/cm^3	
Agregado	2.7 g/cm^3	Normal
	1.3 g/cm^3	Escoria liviana
	0.5 g/cm^3	Vermiculita liviana
	4.5 g/cm^3	Fe_3O_4 pesado
	6.2 g/cm^3	Ferrofósforo pesado
Agua	1 g/cm^3	1.05×10^{-3} litros/cm^3

aislamiento térmico. Otra opción es producir concretos particularmente pesados usando minerales densos o hasta granalla de metal; estos concretos pesados se usan en la construcción de reactores nucleares para tener una mejor absorción de la radiación. En la tabla 18-6 se presentan las densidades de varios agregados.

18-7 Propiedades del concreto

Numerosos factores influyen en las propiedades del concreto. Algunos de los más importantes son la proporción agua-cemento, la cantidad de aire contenido y el tipo de agregados.

Proporción agua-cemento

La proporción agua-cemento afecta el comportamiento del concreto en varias formas:

1. Debe agregarse una cantidad mínima de agua al cemento para asegurar que la totalidad del mismo experimenta la reacción de hidratación. Así, un contenido de agua demasiado pequeño provoca una baja resistencia. Normalmente el límite inferior de la proporción agua-cemento es determinado por otros factores (por ejemplo, su facilidad de trabajo).
2. Una alta proporción de agua-cemento mejora la **facilidad de trabajo** del concreto, esto es, la facilidad con la que la lechada o pasta aguada de concreto puede llenar todos los espacios de un encofrado. Las bolsas de aire o la porosidad interconectada provocadas por la deficiente facilidad de trabajo del concreto reducen la resistencia y la durabilidad de la estructura de concreto. Esta facilidad de trabajo se puede medir mediante una *prueba de revenido*. Por ejemplo, se produce una pieza de concreto de 30 cm de altura (figura 18-8), que se deja sin tocar, soportada por su propio peso. Después de un tiempo, la pieza se deforma. La reducción en altura de la pieza se llama **revenido**. Por lo general, para lograr buena facilidad de trabajo se necesita que el concreto tenga una proporción agua-cemento mínima de alrededor de 0.4 (en peso). Un revenido más pronunciado, provocado por una mayor proporción de agua-cemento, indica una mayor facilidad de trabajo. Los asentamientos de 2.5 a 15 cm son comunes; se necesitan revenidos pronunciados para vaciar o colar encofrados angostos o complejos, en tanto que los revenidos ligeros pueden resultar satisfactorios para estructuras grandes (por ejemplo, cortinas de presas).
3. Si se incrementa la proporción agua-cemento más allá del mínimo requerido para su facilidad de trabajo, se reduce la resistencia del concreto a la compresión. La resistencia a la compresión se mide por lo general determinando el esfuerzo requerido para romper un cilindro de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. La figura 18-9 muestra el efecto de la proporción agua-cemento en la resistencia del concreto.

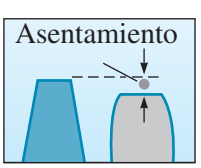


Figura 18-8 Prueba de revenido en la que se mide la deformación de una figura de concreto bajo su propio peso, que sirve para determinar la facilidad de trabajo de una mezcla de concreto.

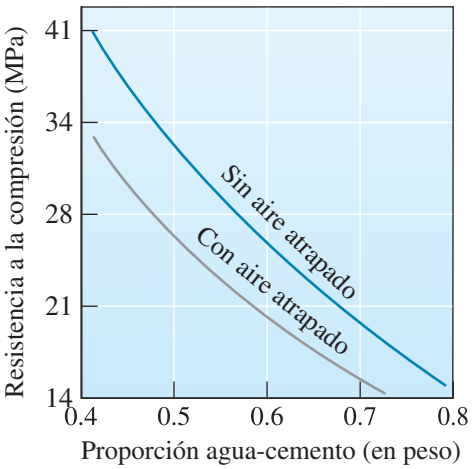


Figura 18-9 Efecto de la proporción agua-cemento, así como del aire atrapado, sobre la resistencia del concreto a la compresión a los 28 días.

4. Las altas proporciones de agua-cemento incrementan la contracción del concreto durante su fraguado, creando riesgo de agrietamiento.

Dados los diferentes efectos de la proporción agua-cemento, es necesario llegar a un término medio entre resistencia, facilidad de trabajo y contracción. Una proporción común en peso es de 0.45 a 0.55. Con la finalidad de mantener una adecuada facilidad de trabajo, pueden agregarse plastificantes orgánicos a la mezcla, con muy pocos efectos sobre la resistencia.

Concreto con aire atrapado

Durante el colado, casi siempre queda atrapada una pequeña cantidad de aire en el concreto. Para los agregados gruesos, como la piedra de 4 cm, es posible que 1% en volumen del concreto sea aire. En el caso de agregados finos, como grava de 1.3 cm, se puede atrapar 2.5% de aire.

Algunas veces, de manera intencional, se atrapa aire dentro del concreto, en ocasiones hasta de 8% en el caso de grava fina. El aire atrapado mejora la facilidad de trabajo del concreto y ayuda a minimizar problemas relacionados con contracciones y situaciones de congelación-descongelación. Sin embargo, el concreto con aire atrapado tiene una menor resistencia (figura 18-9).

Tipo y cantidad de agregados

Las dimensiones del agregado afectan la mezcla de concreto. La figura 18-10 muestra el agua por yarda cúbica que es necesaria para producir el revenimiento que se desea, es decir, la facilidad de trabajo; para agregados más finos se requiere de más agua. La figura 18-11 indica la cantidad de agregados que deben encontrarse en la mezcla de concreto. La proporción en volumen del agregado se basa en la densidad volumétrica de este último, que es de alrededor de 60% de la densidad real que aparece en la tabla 18-6.

Los ejemplos que siguen muestran cómo calcular el contenido para una mezcla de concreto.

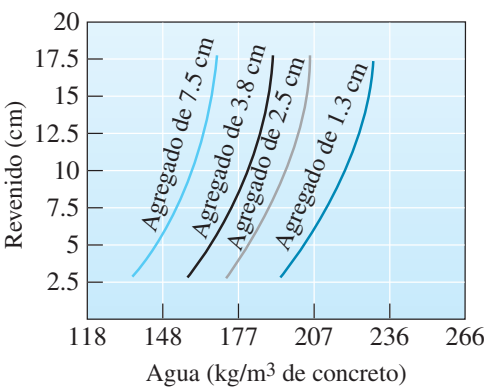


Figura 18-10 La cantidad de agua requerida por yarda cúbica de concreto para obtener la facilidad de trabajo deseada (o asentamiento) depende del tamaño del agregado grueso.

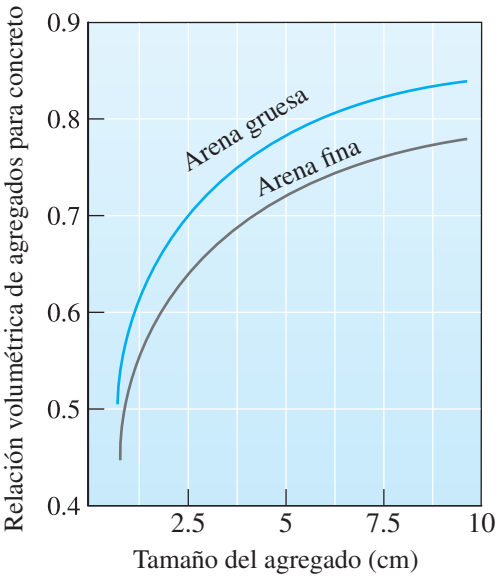


Figura 18-11 Proporción volumétrica de agregados para concreto, la cual depende de las dimensiones de la arena y de los agregados. Observe que la relación volumétrica utiliza la densidad en volumen del agregado: aproximadamente 60% de la densidad real.

Ejemplo 18-2 *Composición del concreto*

Determine las cantidades de agua, cemento, arena y agregados para 4 metros cúbicos de concreto, suponiendo que se desea obtener una proporción agua-cemento de 0.4 (en peso) y que la proporción cemento-arena-agregados es de 1:2.5:4 (en peso). Se usará un agregado "normal", con 1% de agua; la arena contiene 4% de agua. Suponga que no queda aire atrapado en el interior del concreto.

SOLUCIÓN

Un método para calcular la mezcla de concreto consiste en determinar primero el volumen de cada constituyente con base en un saco de cemento (42.6 kg). Se debe recordar que, después del vaciado del concreto, no existen huecos entre los diversos componentes; entonces, es necesario tomar en cuenta en los cálculos la densidad real, no la volumétrica de los constituyentes. Para cada saco de cemento que se usa, el volumen requerido de los materiales es

$$\text{Cemento} = \frac{42.6\ \text{kg/saco}}{3\ \text{g/cm}^3} = 0.014\ \text{m}^3$$

$$\text{Arena} = \frac{2.5 \times 42.6\ \text{kg cemento}}{2.6\ \text{g/cm}^3} = 0.041\ \text{m}^3$$

$$\text{Grava} = \frac{4 \times 42.6\ \text{kg cemento}}{2.7\ \text{g/cm}^3} = 0.063\ \text{m}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{0.4 \times 42.6\ \text{kg cemento}}{1\ \text{g/cm}^3} = 0.017\ \text{m}^3$$

Volumen total del concreto = 0.135 m^3 / saco de cemento
Por lo tanto, en 4 metros cúbicos se necesita

$$\text{Cemento} = \frac{4\ \text{m}^3}{0.135\ \text{m}^3/\text{saco}} = 30\ \text{sacos}$$

$$\text{Arena} = (30\ \text{sacos})(42.6\ \text{kg/saco})(2.5\ \text{arena/cemento}) = 3195\ \text{kg}$$

$$\text{Grava} = (30\ \text{sacos})(42.6\ \text{kg/saco})(4\ \text{grava/cemento}) = 5112\ \text{kg}$$

$$\text{Agua} = (30\ \text{sacos})(42.6\ \text{kg/saco})(0.4\ \text{agua/cemento}) = 511\ \text{kg}$$

La arena contiene 4% de agua y la grava 1%. Para obtener el peso de la arena y la grava *húmedas* se debe realizar un ajuste en el contenido de cada una de ellas:

$$\text{Arena} = (3195 \text{ seca})/0.96 = 3323 \text{ kg y agua} = 128 \text{ kg}$$
$$\text{Grava} = (5112 \text{ seca})/0.99 = 5163 \text{ kg y agua} = 51 \text{ kg}$$

Por lo tanto, en realidad sólo se necesita agregar

$$\text{Agua} = 511 \text{ kg} - 128 \text{ kg} - 51 \text{ kg} = 332 \text{ kg}$$
$$= \frac{332 \text{ kg}}{1 \text{ g/cm}^3} = 332 \text{ litros}$$

En consecuencia, se recomienda combinar 30 sacos de cemento, 3323 kg de arena y 5163 kg de grava con 332 galones de agua.

Ejemplo 18-3 *Diseño de una mezcla de concreto para un muro de retención*

Diseñe una mezcla de concreto que proporcione, a los 28 días, una resistencia de 28 MPa a la compresión, para la construcción de un muro de retención de 13 cm de espesor y 180 cm de altura. Se espera tener aproximadamente 2% de aire atrapado en el concreto, a pesar de que no queda atrapado de forma intencional. La grava contiene 1% de humedad y sólo se dispone de arena gruesa con 5% de humedad.

SOLUCIÓN

Se requiere cierta facilidad de trabajo en el concreto para estar seguros de que el encofrado se llenará por completo en el concreto. Podría resultar apropiado un revenimiento de 8 cm para esta aplicación. El espesor de la pared es de 13 cm. A fin de minimizar en lo posible los costos, se usará grava grande. Un agregado de 2.5 cm de diámetro será el apropiado (aproximadamente 1/5 del espesor de la pared).

Para obtener la facilidad de trabajo deseada utilizando un agregado de 2.5 cm, se debe usar alrededor de 189 kg de agua por metro cúbico (figura 18-10).

Para obtener una resistencia de 28 MPa a la compresión después de 28 días (suponiendo que no hay aire atrapado en forma intencional), se requiere una proporción de 0.57 en peso de agua a cemento (figura 18-9).

En consecuencia, el peso del cemento requerido por metro cúbico de concreto es (189 kg de agua/0.57 de agua-cemento) = 332 kg de cemento.

En vista de que el tamaño del agregado es de 2.5 cm y sólo se dispone de arena gruesa, la proporción volumétrica de la grava al concreto es de 0.7 (figura 18-11). Entonces, la cantidad requerida de grava por yarda cúbica de concreto es de 0.7 m^3; sin embargo, esta cantidad está en función de la densidad volumétrica del agregado. Dado que la densidad volumétrica es aproximadamente 60% de la densidad real, el volumen real ocupado por la grava dentro del concreto es de $0.7 \text{ m}^3 \times 0.6 = 0.42 \text{ m}^3$.

Se determina el volumen de cada uno de los constituyentes por metro cúbico de concreto, con la finalidad de calcular la arena que se requiere:

$$\text{Agua} = 189 \text{ kg}/(1 \text{ g/cm}^3) = 0.19 \text{ m}^3$$
$$\text{Cemento} = 332 \text{ kg}/(3 \text{ g/cm}^3) = 0.11 \text{ m}^3$$
$$\text{Agregado} = 0.42 \text{ m}^3$$
$$\text{Aire} = 0.02 \times 1 \text{ m}^3 = 0.02 \text{ m}^3$$
$$\text{Arena} = 1 - 0.19 - 0.11 - 0.42 - 0.02 = 0.26 \text{ m}^3$$

O bien, convirtiendo a otras unidades, suponiendo que el agregado y la arena están secas:

$$\text{Agua} = 0.19\ \text{m}^3 \times 1\ \text{litro}/1000\ \text{cc} = 190\ \text{litros}$$

$$\text{Cemento} = 332\ \text{kg}/(42.\text{g kg/saco}) = 8\ \text{sacos}$$

$$\text{Agregado} = 0.42\ \text{m}^3 \times 2.7\ \text{g/cm}^3 = 1134\ \text{kg}$$

$$\text{Arena} = 0.26\ \text{m}^3 \times 2.6\ \text{g/cm}^3 = 676\ \text{kg}$$

El agregado y la arena están húmedos. Por lo tanto, las cantidades reales necesarias de grava y arena son

$$\text{Agregado} = 1134/0.99 = 1145\ \text{kg}\ (11\ \text{kg de agua})$$

$$\text{Arena} = 676\ \text{kg}/\ 0.95 = 710\ \text{kg}\ (34\ \text{kg de agua})$$

La cantidad real necesaria de agua es

$$\text{Agua} = 190\,\text{litros} - \frac{(11 + 34\,\text{kg})(1\ \text{litro}/1000\ \text{cc})}{1\ \text{g/cm}^3} = 145\,\text{litros}$$

Entonces, para cada yarda cúbica de concreto se combinarán 6 sacos de cemento, 1145 kg de agregado, 710 kg de arena y 145 litros de agua. Esto debe dar un revenimiento de 8 cm (la facilidad de trabajo deseada), así como una resistencia de 28 MPa a la compresión después de 28 días.

18-8 Concreto reforzado y presforzado

El concreto, igual que otros materiales cerámicos, desarrolla una adecuada resistencia a la compresión. No obstante, debido a las porosidades y a las interfases presentes en la frágil estructura, tiene muy malas propiedades de tensión. Con la finalidad de mejorar la capacidad del concreto para soportar cargas de tensión se usan varios métodos.

Concreto reforzado A menudo se introducen varillas de acero, alambrón o malla de acero, a fin de mejorar la resistencia del concreto a la tensión y la flexión. Los esfuerzos de tensión se transfieren del concreto al acero, que tiene buenas propiedades de tensión. También se pueden usar como refuerzo fibras poliméricas, que tienen mayor resistencia a la corrosión. Por lo que se refiere a los esfuerzos de flexión, el acero soporta la parte sujeta a tensión; la parte bajo compresión la soporta el concreto.

Concreto presforzado En lugar de simplemente colocar varillas de acero como refuerzo en el encofrado, se les puede estirar entre un ancla y un gato mecánico, quedando así bajo tensión durante el colado y el fraguado del concreto. Una vez fraguado el concreto, se libera la tensión sobre el acero, que entonces trata de relajarse de su posición estirada, pero la restricción provocada por el concreto circundante coloca a este último en compresión. Ahora es posible aplicar al concreto esfuerzos más altos de tensión y flexión, debido a los esfuerzos residuales compresivos introducidos por el acero pretensado. A fin de permitir que la tensión externa pueda retirarse oportunamente, en estas aplicaciones con frecuencia se usan cementos de fraguado rápido del tipo III.

Concreto postensado Un método opcional para colocar el concreto bajo compresión consiste en colocar tubos huecos en el concreto antes del vaciado. Una vez fraguado el concreto, las varillas de acero o los cables que se colocan en los tubos se pueden estirar en tensión, actuando en contra del concreto. Conforme las varillas se colocan en tensión, el concreto es puesto en compresión. Las varillas o cables se aseguran entonces de manera permanente en su estado estirado.

18-9 Asfalto

El asfalto es un material compuesto de agregados y **bitumen**, polímero termoplástico que casi siempre se obtiene del petróleo. El asfalto es un material importante para la pavimentación de carreteras. Las propiedades del asfalto se determinan en función de las características de los agregados y de su aglutinante, de sus cantidades relativas y de los aditivos.

El agregado, al igual que en el caso del concreto, debe estar limpio, tener ángulos y una distribución de tamaños de grano para obtener un alto factor de compactación y un buen entrelazamiento entre sus granos (figura 18-12). El aglutinante, compuesto de cadenas termoplásticas, une a las partículas del agregado; tiene un margen de temperaturas útiles relativamente estrecho, ya que se vuelve frágil a temperaturas menores de 0 y comienza a fundirse a temperaturas relativamente bajas. Se pueden usar aditivos, como la gasolina y el queroseno, para modificar el aglutinante, permitir que se licue con más facilidad durante su mezclado y acelerar su fraguado después de su aplicación.

La proporción de aglutinante a agregados es importante. Deberá añadirse justo la cantidad suficiente de aglutinante, de manera que las partículas del agregado se toquen, minimizando así los huecos. Un exceso de aglutinante permitirá la deformación viscosa del asfalto bajo carga. En un asfalto común se encuentra alrededor de 5 a 10% de bitumen. También se requiere de un poco de espacios vacíos, por lo general de 2 a 5%. Cuando el asfalto se somete a compresión, el aglutinante puede pasar a los huecos en vez de ser expulsado de la superficie y perderse. Sin embargo, demasiado espacio vacío permite que el agua penetre en la estructura; esto incrementa la rapidez de deterioro del asfalto y puede tornar frágil el aglutinante. Se usan emulsiones de asfalto para sellar calzadas. Por lo general, el agregado para asfalto es arena y grava fina; no obstante, existe algún interés en usar como agregados productos reciclados de vidrio. El **glasfalto** es una aplicación útil del vidrio triturado. De manera similar, también existen aplicaciones para materiales desarrollados con asfalto y neumáticos desmenuzados.

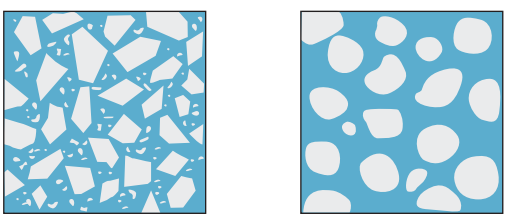


Figura 18-12 Estructura ideal para el asfalto *a*) en comparación con la estructura no deseable, *b*) en la que los granos redondeados, una distribución angosta de granos y un exceso de aglutinante reducen en conjunto la resistencia del material final.

Resumen

- Los materiales de construcción desempeñan una función vital en la infraestructura de cualquier país. Los materiales de construcción que más se usan son el concreto, la madera, el asfalto, el vidrio, los materiales compuestos y los aceros.
- También los materiales avanzados, que se usan en la fabricación de sensores y activadores, representan un papel de importancia creciente en la vigilancia del estado físico de edificios y puentes. Existen nuevos recubrimientos y películas delgadas sobre vidrios que han contribuido a una mayor eficiencia en el uso de la energía en edificios.
- La madera es un compuesto polimérico reforzado con fibras de origen natural. Las fibras de celulosa están formadas por celdas alineadas que proporcionan un excelente refuerzo en la dirección longitudinal de la madera, pero bajas resistencia y rigidez en direcciones perpendiculares a las celdas y las fibras. Así, las propiedades de la madera son altamente anisotrópicas, y dependen de la especie del árbol y de la cantidad de humedad presente en la madera. La madera también tiene una adecuada resistencia a la tensión, pero una deficiente resistencia a la compresión.
- El concreto es un compuesto particulado. En el concreto se usan partículas cerámicas, como arena y grava, para rellenos en una matriz de cemento cerámico. La proporción de agua-cemento es un factor que determina el comportamiento del concreto. Este comportamiento se puede modificar atrapando aire y variando la composición tanto del cemento como de los materiales agregados. El concreto tiene una adecuada resistencia a la compresión, pero su resistencia a la tensión es deficiente.

- El asfalto también es un compuesto particulado; usa el mismo tipo de agregados que el concreto, pero en un aglutinante polimérico orgánico.

Glosario

Agregado Combinación de grava, arena, piedra triturada o escoria.

Albura Celdas huecas vivas de la madera que almacenan nutrientes y sirven de conducto para el agua.

Bitumen Aglutinante orgánico para el asfalto, formado de polímeros y aceites de bajo punto de fusión.

Cambium Capa de celdas en crecimiento en la madera.

Capas Hojas individuales de chapa de madera con las cuales se fabrica la madera contrachapada.

Celulosa Fibra polimérica natural que es el más importante de los constituyentes de la madera. Tiene un alto grado de polimerización.

Cemento hidráulico Cemento que fragua y se endurece bajo el agua.

Cemento no hidráulico Cemento que no puede endurecer bajo el agua y que requiere de aire para su endurecimiento.

Cemento Portland Cemento hidráulico hecho de silicatos de calcio; la composición aproximada es CaO (~60-65%), SiO_2 (~20-25%), así como óxido de hierro y alúmina (~7 a 12%).

Cementos Materiales inorgánicos que fraguan y se endurecen después de haberse mezclado con agua en una pasta.

Concreto Material compuesto formado por un medio aglomerante en el que las partículas del agregado están dispersas.

Duramen Centro del árbol, formado por celdas muertas, que le brinda soporte mecánico al árbol.

Extractivos Impurezas existentes en la madera.

Facilidad de trabajo Facilidad con la que una lechada de concreto llena todo el espacio del interior de un encofrado.

Glasfalto Asfalto cuyo agregado incluye vidrio reciclado.

Hemicelulosa Fibra polimérica natural que es un constituyente importante en la madera. Tiene un bajo grado de polimerización.

Lignina Cemento polimérico en la madera que une entre sí las celdas de ésta.

Microfibrilla Paquetes de celulosa y otras cadenas poliméricas que sirven de fibras de refuerzo en la madera.

Mortero Se elabora mezclando cemento, agua, aire y agregados finos. El concreto tiene todos los agregados del mortero y además agregados gruesos.

Revenimiento Reducción en altura de una forma estándar de concreto cuando éste se asienta por efecto de su propio peso.

Problemas

Sección 18-1 Estructura de la madera

Sección 18-2 Contenido de humedad y densidad de la madera

Sección 18-3 Propiedades mecánicas de la madera

Sección 18-4 Expansión y contracción de la madera

Sección 18-5 Madera contrachapada (triplay)

18-1 La tabla 18-1 contiene las densidades para maderas comunes. Calcule las densidades de las maderas después de haberse secado por completo y tener un contenido de agua de 100%.

18-2 Utilice la tabla 18-1 para determinar si existe relación entre la densidad y el módulo de elasticidad de las maderas listadas.

18-3 Una muestra de madera con dimensiones de 8 cm × 10 cm × 30 cm tiene una densidad de 0.35 g/cm^3 en seco.

a) Calcule la cantidad de galones de agua que la muestra debe absorber para que llegue a contener 120% de agua.

b) Calcule la densidad de la madera después de que haya absorbido esta cantidad de agua.

18-4 La densidad de una muestra de roble es de 0.90 g/cm^3. Calcule *a*) la densidad del roble totalmente seco y
b) el porcentaje de humedad en la muestra original.

18-5 Una madera verde con densidad de 0.82 g/cm^3 contiene 150% de agua. La resistencia a la compresión de esta madera es de 27 MPa. Después de varios días de secado, la resistencia a la compresión aumenta a 41 MPa. ¿Cuál es el contenido de agua y la densidad de la madera seca? Consulte la figura 18-4.

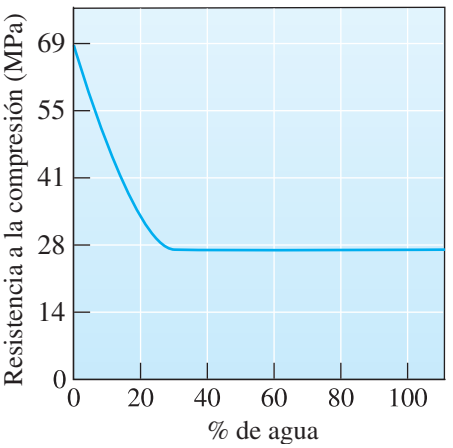


Figura 18-4 Efecto del porcentaje de agua de una madera común en la resistencia a la compresión en dirección paralela al grano. (Repetida para el problema 18-5.)

18-6 Determine la expansión del cedro en dirección radial cuando cambia su contenido de agua de 12 a 27%. La dimensión inicial es de 30 cm.

18-7 Se usan tablas de roble de 0.5 cm de grueso, 1 m de largo y 0.25 m de ancho para el piso de una superficie de 10 × 10 m. Si el piso fue colocado con un contenido de humedad de 25% y la humedad esperada podría ser de hasta 45%, determine el cambio en las dimensiones del piso, paralelo y perpendicular a la longitud de las tablas, las cuales fueron cortadas de troncos con un corte tangencial-longitudinal.

18-8 En una sala de 18 × 18 metros se usa un piso fabricado de tablones de arce de 3 cm de espesor, 15 cm de ancho y 40 cm de largo. Los tablones fueron cortados utilizando un corte tangencial-longitudinal. El piso se coloca cuando los tablones alcanzan un contenido de humedad de 12%. Después de algunos días particularmente húmedos, la humedad de los tablones aumenta hasta 45%. Determine el cambio dimensional en el piso en la dirección paralela a los tablones y también perpendicular a los mismos. ¿Qué le sucederá al piso? ¿Cómo puede corregirse este fenómeno?

18-9 Se está construyendo un muro de 9 m de largo usando cortes radiales-longitudinales de pino de 13 cm de ancho y disponiendo los tablones de forma vertical. La madera contiene 55% de humedad al construirse el muro; sin embargo, se mantiene el nivel de humedad en la habitación para darle 45% de humedad a la madera. Determine los cambios dimensionales que ocurrirán en los tablones y estime el tamaño de los huecos que se producirán como consecuencia de dichos cambios.

Sección 18-6 Materiales de concreto

Sección 18-7 Propiedades del concreto

Sección 18-8 Concreto reforzado y presforzado

Sección 18-9 Asfalto

18-10 ¿Cuál es la proporción máxima de agua en el cemento que resulta aceptable para una estructura que debe mostrar una resistencia a la compresión de por lo menos 35 MPa? (Vea la figura 18-7.)

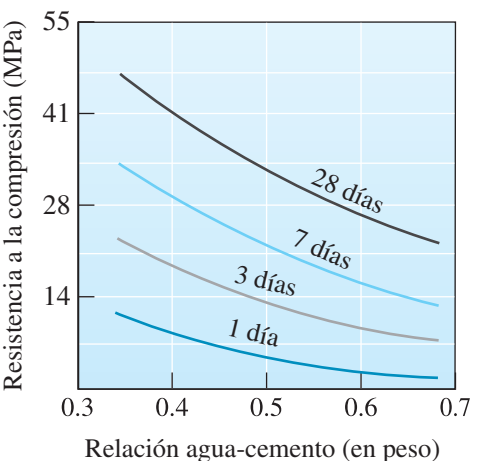


Figura 18-7 La resistencia del concreto a la compresión aumenta conforme pasa el tiempo. Después de 28 días, el concreto prácticamente ha alcanzado su resistencia máxima. (Repetido para problema 18-10.)

18-11 Determine las cantidades de agua, cemento y arena en 10 m^3 de concreto, si la proporción de cemento, arena y agregado es de 1:2.5:4.5 y la proporción de agua y cemento es de 0.4. Suponga que no hay aire atrapado en el concreto. La arena que se usó para esta mezcla contiene 4% en peso de agua y el agregado 2% en peso de agua.

18-12 Calcule la cantidad de cemento, arena, agregado y agua necesaria para crear una mezcla de con-

creto con una resistencia de 34 MPa a la compresión, después de 28 días, para una estructura de 10 × 10 × 0.25 m dadas las siguientes condiciones: revenimiento permitido = 10 cm y para este proyecto sólo se dispone de agregado de 3.8 cm, con 2% de humedad, y arena gruesa con 4% de humedad. En sus cálculos, suponga que no hay aire atrapado.

18-13 Se ha solicitado preparar 80 m^3 de concreto normal que usa una proporción volumétrica de cemento, arena y agregado grueso de 1:2:4. La proporción de agua y cemento (en peso) debe ser de 0.5. La arena contiene 6% y la grava 3% de agua en peso. No se espera que entre aire.

a) Determine el número de sacos de cemento que deben solicitarse, las toneladas requeridas de arena y agregado, así como el agua necesaria.

b) Calcule el peso total del concreto por metro cúbico.

c) ¿Cuál es la proporción en peso de cemento, arena y agregado grueso?

18-14 Se piensa preparar 10 m^3 de concreto usando una proporción en peso de 1:2.5:4.5 de cemento, arena y agregado grueso. La proporción de agua y cemento (en peso) es de 0.45. La arena contiene 3% en peso de agua, el agregado grueso 2% y se espera aire atrapado por un equivalente de 5%. Determine el número de sacos de cemento, las toneladas de arena y de agregado grueso, así como los galones de agua necesarios.

Problemas de diseño

18-15 Una estructura de madera está operando como sistema controlado por el entorno a una humedad de 65%. Diseñe una columna de soporte de madera que debe sostener una carga de 90000. La distancia de la parte superior de la columna a la inferior deberá ser de 240± 0.63 cm una vez aplicada la carga.

18-16 Diseñe un piso de madera de 15 × 15 m que estará en un ambiente donde los cambios en la humedad provocarán una fluctuación de más o menos 5% de agua en la madera. Se desea reducir al mínimo cualquier pandeo o formación de espacios libres en la madera.

18-17 Se desea producir un concreto adecuado para su uso en la construcción de una estructura grande en un ambiente sulfuroso. Para estas situaciones, la proporción máxima de agua y cemento deberá ser 0.45 (en peso). La resistencia del concreto a la compresión, después de 28 días, deberá ser por lo menos de 28 MPa. Se dispone de agregado grueso que contiene 2% de humedad en varios tamaños, así como arena fina y gruesa con 4% de humedad. Diseñe un concreto que sea adecuado para esta aplicación.

18-18 Se desea elaborar una escultura de concreto. En algunos sitios, la escultura tendrá un espesor de 8 cm y deberá ser ligera, pero deberá tener una resistencia de 14 MPa a la compresión después de 28 días. El agregado disponible contiene 1% de humedad y la arena 5%. Diseñe un concreto adecuado para esta aplicación.

18-19 El aglutinante que se usa para producir el asfalto tiene una densidad de aproximadamente 1.3 g/cm^3. Diseñe un asfalto adecuado para usarse como pavimento, incorporando tanto el peso como los volúmenes de cada uno de los elementos incluidos. Suponga que las arenas y los agregados son los mismos que los de un concreto convencional.

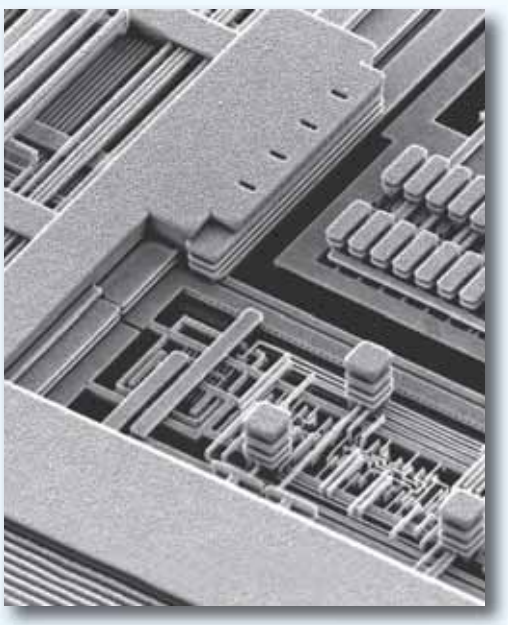
18-20 *Diseño de una canoa de concreto*. Describa cuáles nuevos materiales podrían usarse para fabricar una canoa de concreto.

Problemas Knovel[MR]

K18-1 ¿Cuál es la diferencia en el contenido de lignina entre especies de madera dura y de madera blanda? ¿Cuál es la estructura química de la lignina?

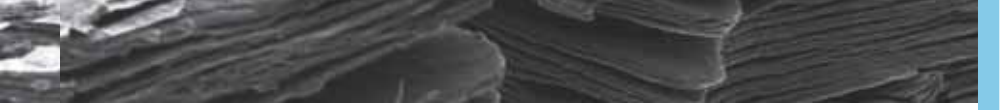
K18-2 El contenido de humedad de equilibrio de la madera es el contenido de humedad al que la madera no gana ni pierde humedad. ¿Cuál es el contenido de humedad de la madera a 70°F con una humedad relativa de 50%?

K18-3 ¿Qué medidas se utilizan para controlar el agrietamiento en el concreto reforzado?



El primer circuito integrado fue fabricado en 1958 por Jack Kilby, quien en ese entonces era ingeniero de Texas Instruments. Este circuito funcionaba como oscilador de desplazamiento de fase y estaba formado por transistores, resistores y condensadores (también llamados *capacitores*), como se aprecia en la imagen superior. (*Cortesía de Texas Instruments.*) Por primera vez, los dispositivos electrónicos múltiples se incorporaron en un solo sustrato. Por esta innovación, a Jack Kilby se le otorgó el Premio Nobel de Física en el año 2000.

En la actualidad, los microchips pueden contener cientos de millones de transistores. Los chips de memoria dinámica de acceso aleatorio (MDAA) han superado el punto de referencia del millar de millones de transistores. Esta integración de dispositivos ha sido posible gracias a sofisticados equipos y técnicas de manufactura. La imagen superior muestra las capas múltiples de cobre necesarias para establecer las conexiones entre los transistores y otros elementos de circuito. El óxido aislante entre los alambres se ha eliminado. Los transistores no son visibles en esta imagen. *(Cortesía de International Business Machines Corporation, © International Business Machines Corporation.)*



CAPÍTULO

19

Materiales electrónicos

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Si el diamante es buen conductor de la electricidad?*
- *¿Cuántos dispositivos hay en un microchip?*
- *¿Cómo se depositan las películas delgadas, de menos de 1 micrón de grosor, en un sustrato?*
- *¿Cómo se calientan los alimentos en un horno de microondas?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Calcular la conductividad eléctrica de un metal, semiconductor o aislante.
- Calcular el número de portadores libres en un sólido.
- Explicar cómo el principio de exclusión de Pauli da lugar a la estructura de bandas de los sólidos.
- Dibujar diagramas esquemáticos que representen las estructuras de bandas comunes de los metales, semiconductores y aislantes, e identificar y explicar las características fundamentales de estos diagramas, en particular la brecha de banda.
- Explicar cómo la estructura de bandas de los sólidos da lugar a las propiedades eléctricas de los metales, semiconductores y aislantes.
- Explicar cómo cambia la conductividad con la temperatura para los metales, semiconductores y aislantes eléctricos.
- Definir el término orificio, o hueco, en el contexto de los materiales electrónicos.
- Explicar el propósito del dopante en los semiconductores y cómo éste modifica las propiedades eléctricas.
- Describir los procesos que se utilizan en la fabricación de circuitos integrados.
- Describir los mecanismos de polarización en materiales.

La microelectrónica basada en el silicio es omnipresente en la vida moderna. Los microchips forman parte de aparatos que van desde lavadoras de ropa y hornos de microondas hasta teléfonos celulares y reproductores de música, y desde computadoras personales hasta las computadoras más rápidas del mundo, razón por la cual el silicio fue el material que caracterizó al siglo XX y dominará las tecnologías de información y computacionales en el futuro próximo.

No obstante que el silicio es el sustrato o material base elegido para la mayoría de los dispositivos, la microelectrónica incluye materiales de casi todas las clases, incluyendo metales como el cobre y el oro, otros semiconductores como el arseniuro de galio y aislantes como el dióxido de silicio; incluso los polímeros semiconductores están encontrando aplicaciones en estos dispositivos (por ejemplo, en los diodos emisores de luz).

En este capítulo se estudiarán los principios de conductividad eléctrica en metales, semiconductores, aislantes y materiales iónicos. Se verá que una diferencia determinante entre los metales y semiconductores es que, cuando la temperatura se incrementa, la resistividad de un metal también aumenta, mientras que la resistividad de un semiconductor disminuye. Esta diferencia fundamental surge de las **estructuras de bandas** de estos materiales. La estructura de bandas está formada por el conjunto de niveles de energía que están disponibles o prohibidos para que los electrones los ocupen, y determina el comportamiento electrónico de un sólido, se trate de un conductor, un semiconductor o un aislante.

La conductividad de un semiconductor que no contiene impurezas por lo general aumenta de manera exponencial con la temperatura. Desde el punto de vista de la fiabilidad, esta dependencia exponencial de la conductividad en la temperatura es poco deseable en los dispositivos electrónicos que generan calor cuando operan. Por consiguiente, a los semiconductores se les dopa (es decir, se les añaden impurezas intencionalmente) para controlar con extrema precisión su conductividad. También se estudiará la forma en que los **dopantes** cambian la estructura de banda de un semiconductor, de modo que la conductividad eléctrica pueda adaptarse a las diferentes aplicaciones.

Metales, semiconductores y aislantes son componentes fundamentales en los circuitos integrados. En la actualidad, algunas características de los circuitos integrados están adquiriendo dimensiones de escala atómica, y la fabricación de circuitos integrados es presumiblemente el proceso de manufactura más refinado que existe. Este proceso consiste en la fabricación simultánea de cientos de millones, e incluso miles de millones, de dispositivos en un solo microchip, y representa un paradigma de manufactura fundamentalmente distinto al de cualquier otro proceso. Se estudiarán algunos de los pasos a seguir en la fabricación de circuitos integrados, incluyendo el proceso de depositar películas delgadas (películas de 10 Å a 1 μm de grosor).

Se estudiarán algunas de las propiedades de los materiales aislantes. Los aislantes se usan en dispositivos microelectrónicos para aislar entre sí las regiones activas eléctricamente. También se usan en capacitores por sus propiedades dieléctricas. Por último, se estudiarán los materiales piezoeléctricos, los cuales cambian su forma en respuesta a un voltaje aplicado o viceversa. Estos materiales se usan como activadores en una gran variedad de aplicaciones.

Los **superconductores** comprenden una clase especial de materiales electrónicos, que no presentan resistencia eléctrica alguna bajo ciertas condiciones (las cuales por lo general incluyen una temperatura muy baja, del orden de 135 K o menos) y que expelen completamente un campo magnético. Un análisis de la superconductividad está fuera del propósito de este libro.

19-1 Ley de Ohm y conductividad eléctrica

La mayoría de nosotros estamos familiarizados con la forma común de la ley de Ohm,

$$V = IR \tag{19-1}$$

donde V es el voltaje (volts, V), I la corriente (amperes o amps, A) y R la resistencia (ohms, Ω) al flujo de la corriente. Esta ley se aplica a la mayoría de los materiales. La resistencia (R) de un resistor es una característica del tamaño, la forma y las propiedades de los materiales con base en

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\sigma A} \tag{19-2}$$

donde l es la longitud (cm) del resistor, A el área de la sección transversal (cm^2) del resistor, ρ la resistividad eléctrica (ohm · cm, es decir, Ω · cm) y σ, que es el recíproco de ρ, es la conductividad eléctrica ($ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$). La magnitud de la resistencia depende de las dimensiones del resistor. La resistividad (o conductividad) no depende de las dimensiones del material, por lo que permite comparar materiales diferentes. Por ejemplo, la plata es un mejor conductor que el cobre. La resistividad es una **propiedad sensible a la microestructura**, similar a la resistencia a la fluencia (límite elástico). La resistividad del cobre puro es mucho menor que la del cobre comercialmente puro, porque las impurezas en el cobre comercialmente puro dispersan los electrones y contribuyen a una mayor resistividad. Del mismo modo, la resistividad del cobre puro recocido es un poco menor que la del cobre puro trabajado en frío, debido al efecto de dispersión asociado con las dislocaciones.

En componentes diseñados para conducir energía eléctrica, es importante reducir al mínimo las pérdidas de energía, pero no sólo para conservarla, sino también para reducir el calentamiento al mínimo. La potencia eléctrica P (en watts, W) perdida cuando una corriente pasa por una resistencia está dada por

$$P = VI = I^2R \tag{19-3}$$

Una resistencia R alta resulta en mayores pérdidas de potencia. Estas pérdidas eléctricas se conocen como pérdidas de calentamiento de Joule.

Una segunda forma de la ley de Ohm se obtiene si se combinan las ecuaciones 19-1 y 19-2 para obtener

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l}$$

Si se define I/A como la **densidad de corriente** J (A/cm^2) y V/l como el **campo eléctrico** E (V/cm), entonces

$$J = \sigma E \tag{19-4}$$

La densidad de corriente J también se obtiene con

$$J = nq\bar{v}$$

donde n es el número de portadores de carga (portadores/cm^3), q la carga en cada portador (1.6×10^{-19} C) y el promedio de la **velocidad de deriva** (cm/s) o velocidad de deriva media a la que se mueven los portadores de carga [figura 19-1*a*)]. Por lo tanto,

$$\sigma E = nq\bar{v} \quad \text{o} \quad \sigma = nq\frac{\bar{v}}{E}$$

Ocurre una difusión como resultado de los gradientes de temperatura y de concentración, y el desplazamiento se presenta como resultado de un campo eléctrico o magnético aplicado. La conducción puede ocurrir como resultado de la difusión, del desplazamiento, o de ambos, pero el desplazamiento es el mecanismo dominante en la conducción eléctrica.

El término $\bar{v}/E$ se llama **movilidad** $\mu \left(\frac{cm^2}{V \cdot s}\right)$ de los portadores (que en el caso de los metales es la movilidad de los electrones):

$$\mu = \frac{\bar{v}}{E}$$

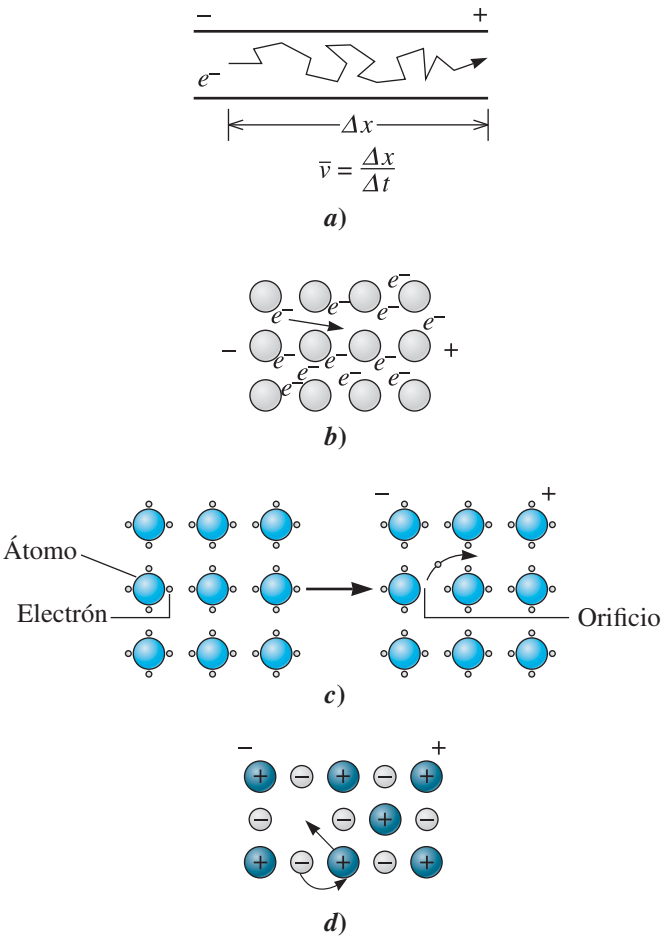


Figura 19-1 *a*) Los portadores de carga, como los electrones, son desviados por átomos o defectos y siguen una trayectoria irregular por un conductor. La rapidez media a la que se mueven los portadores es la velocidad de deriva. *b*) Los electrones de valencia en metales se mueven con facilidad. *c*) Los enlaces covalentes deben romperse y descomponerse en semiconductores y aislantes que no contienen impurezas para que un electrón pueda moverse. *d*) En muchos materiales enlazados iónicamente es necesario que se difundan iones completos por medio de mecanismos de vacancia para transportar carga.

Por último,

$$\sigma = nq\mu \tag{19-5a}$$

La carga q es una constante; al inspeccionar la ecuación 19-5*a* se encuentra que es posible controlar la conductividad eléctrica de los materiales al 1) controlar el número de portadores de carga en el material, o 2) controlar la movilidad, o facilidad de movimiento, de los portadores de carga. La movilidad es particularmente importante en los metales, mientras que el número de portadores es más importante en los semiconductores y aislantes.

Los electrones son los portadores de carga en metales [figura 19-1*b*)]. Por supuesto que los electrones tienen carga negativa. En los semiconductores, los electrones conducen la carga en la misma forma que los portadores de carga positiva conocidos como **orificios,** o **huecos** [figura 19-1*c*)]. Se aprenderá más acerca de los orificios en la sección 19-4. En los semiconductores, los electrones y los orificios se mueven en direcciones opuestas en respuesta a un campo eléctrico aplicado, pero al hacerlo ambos contribuyen a la corriente neta. Por lo tanto, la ecuación 19-5*a*) se puede modificar como sigue para expresar la conductividad de los semiconductores:

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \tag{19-5b}$$

En esta ecuación, μ_n y μ_p son las movilidades de electrones y orificios, respectivamente. Los términos n y p representan las concentraciones de electrones libres y orificios en el semiconductor.

Cuando se presenta la conducción en las cerámicas, puede ser el resultado de electrones que "saltan" de un defecto a otro o del movimiento de iones [figura 19-1*d*)]. La movilidad depende del enlace atómico, de las imperfecciones, de la microestructura y, en compuestos iónicos, de la rapidez de difusión.

Debido a estos efectos, la conductividad eléctrica de los materiales varía considerablemente, como se ilustra en la tabla 19-1. Estos valores son aproximados y son para materiales de una pureza alta a 300 K (a menos que se indique otra cosa). Observe que los valores de la conductividad para metales y semiconductores dependen en gran medida de la temperatura. La tabla 19-2 incluye algunas unidades y relaciones útiles.

Tabla 19-1 Conductividad eléctrica de materiales seleccionados a $T = 300$ K*

Material	Conductividad ($ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$)	Material	Conductividad ($ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$)
Superconductores		**Semiconductores**	
Hg, Nb_3Sn		Elementos del grupo 4B	
$YBa_2Cu_3O_{7-x}$	Infinita (bajo ciertas condiciones,	Si	4×10^{-6}
MgB_2	como bajas temperaturas)	Ge	0.02
Metales		**Semiconductores compuestos**	
Metales alcalinos		GaAs	2.5×10^{-9}
Na	2.13×10^5	AlAs	0.1
K	1.64×10^5	SiC	10^{-10}
Metales alcalinotérreos		**Conductores iónicos**	
Mg	2.25×10^5	Óxido de estaño indio (ITO)	$\sim 10^4$
Ca	3.16×10^5	Circonio estabilizado con itrio (YSZ)	$< 10^{14}$
Metales del grupo 3B		**Aislantes, dieléctricos lineales y no lineales**	
Al	3.77×10^5	Polímeros	
Ga	0.66×10^5	Polietileno	10^{-15}
Metales de transición		Politetrafluoretileno	10^{-18}
Fe	1.00×10^5	Poliestireno	10^{-17} a 10^{-19}
Ni	1.46×10^5	Epoxi	10^{-12} a 10^{-17}
Metales del grupo 1B		Cerámicas	
Cu	5.98×10^5	Alúmina (Al_2O_3)	10^{-14}
Ag	6.80×10^5	Vidrios de silicato	10^{-17}
Au	4.26×10^5	Nitruro de boro (BN)	10^{-13}
		Titanato de bario ($BaTiO_3$)	10^{-14}
		C (diamante)	$< 10^{-18}$

**A menos que se especifique de otro modo, se supone un material de alta pureza.*

Tabla 19-2 Algunas relaciones, constantes y unidades de utilidad

Electrón volt = 1 eV = 1.6×10^{-19} joule = 1.6×10^{-12} erg
1 amp = 1 coulomb/segundo
1 volt = 1 amp · ohm
$k_B T$ a temperatura ambiente (300 K) = 0.0259 eV
c = velocidad de la luz 2.998×10^8 m/s
ε_0 = permisividad del espacio libre = 8.85×10^{-12} F/m
q = carga del electrón = 1.6×10^{-19} C
Constante de Avogadro $N_A = 6.022 \times 10^{23}$
k_B = constante de Boltzmann = 8.617×10^{-5} eV/K = 1.38×10^{-23} J/K
h = constante de Planck 6.63×10^{-34} J·s = 4.14×10^{-15} eV·s

Dependiendo de la magnitud de su conductividad eléctrica, los materiales electrónicos se clasifican en *a*) superconductores, *b*) conductores, *c*) semiconductores y *d*) dieléctricos o aislantes. Los materiales con una conductividad menor que $10^{-12}\ \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$, o resistividad mayor a $10^{12}\ \Omega \cdot$ cm, se consideran aislantes o dieléctricos; los materiales con conductividad menor de $10^3\ \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$ pero mayor que $10^{-12}\ \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$ se consideran semiconductores. Los materiales con conductividad mayor a $10^3\ \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$, o resistividad menor que $10^{-3}\ \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$, son considerados conductores. (Estos intervalos de valores son aproximados.)

El término "dieléctrico" se refiere a materiales empleados en aplicaciones donde la constante dieléctrica es importante. La **constante dieléctrica (k)** de un material es una propiedad sensible a la microestructura relacionada con la capacidad del material para almacenar una carga eléctrica. El término "aislante" se usa para describir la capacidad de un material para detener el paso de una corriente directa o alterna, en contraposición a su capacidad para almacenar una carga. Una medida de la eficacia de un aislante es el campo eléctrico máximo que puede soportar sin ruptura eléctrica.

Ejemplo 19-1 *Diseño de una línea de transmisión*

Diseñe una línea de transmisión eléctrica de 1500 m de largo que llevará una corriente de 50 A con una pérdida de potencia no mayor de 5×10^5 W. La conductividad eléctrica de diversos materiales se muestra en la tabla 19-1.

SOLUCIÓN

La potencia eléctrica está dada por el producto del voltaje y la corriente, es decir,

$$P = VI = I^2R = (50)^2R = 5 \times 10^5\,\text{W}$$
$$R = 200\,\text{ohms}$$

De la ecuación 19-2,

$$A = \frac{l}{R \cdot \sigma} = \frac{(1500\,\text{m})(100\,\text{cm/m})}{(200\,\text{ohms})\sigma} = \frac{750}{\sigma}$$

Considere tres metales que tienen una excelente conductividad eléctrica: aluminio, cobre y plata. La siguiente tabla incluye datos apropiados y algunas características de la línea de transmisión para cada metal.

	σ (ohm^{-1} · cm^{-1})	A (cm^2)	Diámetro (cm)
Aluminio	3.77×10^5	0.00199	0.050
Cobre	5.98×10^5	0.00125	0.040
Plata	6.80×10^5	0.00110	0.037

Cualquiera de los tres metales funcionará, pero el costo también es un factor a considerar. Es probable que el aluminio sea la opción más económica (capítulo 14), aun cuando tiene el diámetro mayor. Otros factores, por ejemplo si el alambre puede sostenerse a sí mismo entre postes de transmisión, también contribuyen a la selección final.

Ejemplo 19-2 *Velocidad de deriva de electrones en cobre*

Suponiendo que todos los electrones de valencia contribuyen al paso de corriente, *a*) calcule la movilidad de un electrón en cobre y *b*) calcule el promedio de la velocidad de deriva para los electrones en un alambre de cobre de 100 cm cuando se le aplican 10 V.

SOLUCIÓN

a) La valencia del cobre es 1; por lo tanto, el número de electrones de valencia es igual al número de átomos de cobre en el material. El parámetro de red del cobre es 3.6151×10^{-8} cm y, como el cobre es CCA, hay cuatro átomos por celda unitaria. De la tabla 19-1, la conductividad es $\sigma = 5.98 \times 10^5\ \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

$$n = \frac{(4\ \text{átomos/celdas})(1\ \text{electrón/átomo})}{(3.6151 \times 10^{-8}\,\text{cm})^3/\text{celdas}} = 8.466 \times 10^{22}\,\text{electrones/cm}^3$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19}\,\text{C}$$

$$\mu = \frac{\sigma}{nq} = \frac{5.98 \times 10^5\ \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}}{(8.466 \times 10^{22}\ \text{electrones/cm}^3)(1.6 \times 10^{-19}\text{C})}$$

$$= 44.1\ \frac{\text{cm}^2}{\Omega \cdot \text{C}} = 44.1\ \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

b) El campo eléctrico es

$$E = \frac{V}{l} = \frac{10\ \text{V}}{100\ \text{cm}} = 0.1\ \text{V/cm}$$

La movilidad es 44.1 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$; por lo tanto,

$$\bar{v} = \mu E = [44.1\ \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})](0.1\ \text{V/cm}) = 4.41\ \text{cm/s}$$

19-2 Estructura de las bandas de sólidos

Como se vio en el capítulo 2, los electrones de átomos individuales ocupan niveles fijos y discretos de energía. El principio de exclusión de Pauli se satisface para cada átomo porque sólo dos electrones, como máximo, ocupan cada nivel de energía, u orbital. Cuando N átomos se unen para formar un sólido, el principio de exclusión de Pauli sigue exigiendo que no más de dos electrones del sólido tengan la misma energía. Cuando dos átomos se aproximan entre sí para formar un enlace, el principio de exclusión de Pauli se violaría si los niveles de energía de los electrones no cambiaran. Así, los niveles de energía de los electrones "se dividen" para formar nuevos niveles de energía.

La figura 19-2 ilustra este concepto de manera esquemática. Considere dos átomos que se aproximan entre sí para formar un enlace. Los orbitales que contienen los electrones de valencia están (en promedio) más alejados del núcleo que los orbitales que contienen el "núcleo" o electrones interiores. Los orbitales que contienen los electrones de valencia de un átomo interaccionan primero con los orbitales que contienen los electrones de valencia del otro átomo. Como los orbitales de estos

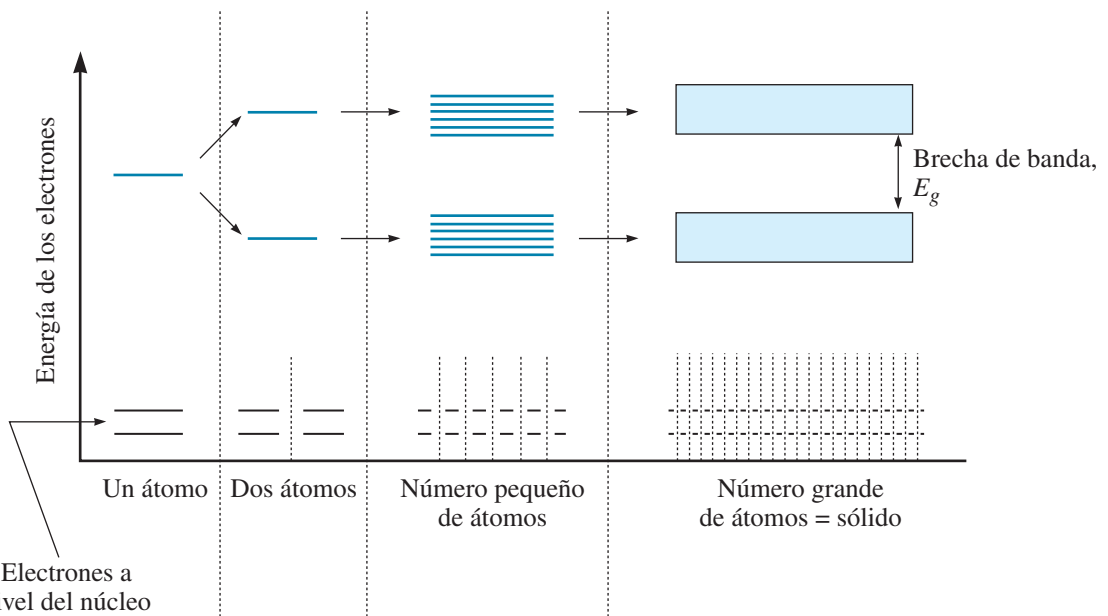


Figura 19-2 Los niveles de energía se ensanchan en bandas cuando aumenta el número de electrones agrupados. (*Cortesía de John Bravman.*)

electrones tienen la misma energía cuando los átomos están en aislamiento, los orbitales cambian de energía o "se dividen", de modo que se satisface el principio de exclusión de Pauli. Como se aprecia en la figura 19-2, cuando se consideran dos átomos, cada uno con un orbital de interés, uno de los orbitales pasa al nivel de energía más alto, mientras que el otro pasa al nivel de energía más bajo. Los electrones de los átomos ocuparán estos nuevos orbitales al llenar primero los niveles de energía más bajos. A medida que aumenta el número de átomos, también se incrementa el número de niveles de energía. Por cada orbital de cada átomo se forma un nuevo orbital con su propia energía, y cuando aumenta el número de átomos del sólido, la separación en energía entre los orbitales se hace más fina, formando al final lo que se denomina una banda de energía. Por ejemplo, cuando N átomos se unen para formar un sólido, la banda de energía $2s$ contiene N niveles discretos de energía, uno por cada átomo del sólido porque cada átomo contribuye con un orbital.

Para que los portadores de carga conduzcan, deben tener la capacidad de acelerarse e incrementar su energía. La energía de los portadores puede aumentar sólo si hay estados de energía disponibles a los que puedan ascender. Por consiguiente, la distribución particular de los estados de energía en la estructura de bandas de un sólido tiene implicaciones de importancia decisiva para sus propiedades eléctricas y ópticas.

Dependiendo del tipo de material involucrado (metal, semiconductor, aislante), puede o no haber una brecha de energía entre los niveles de energía de los orbitales que pasaron a un estado de energía más bajo y los niveles de energía de los orbitales que pasaron a un estado de energía más alto. Esta brecha de energía, si existe, se conoce como brecha de banda, la cual se estudiará con detalle más adelante.

Estructura de bandas del sodio

El sodio es un metal y tiene la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. La figura 19-3 muestra un diagrama esquemático de la estructura de bandas del sodio como una función de la separación interatómica. (Observe que la figura 19-2 presenta un diagrama general de las bandas para una separación interatómica fija.) Las energías dentro de las bandas dependen de la separación entre los átomos; la línea vertical representa la separación interatómica de equilibrio de los átomos en el sodio sólido.

El sodio y otros metales alcalinos de la columna 1A de la tabla periódica tienen sólo un electrón en el nivel s más externo. La banda de valencia $3s$ en el sodio está llena a la mitad y en el cero absoluto sólo están ocupados los niveles más bajos de energía. La **energía de Fermi** (E_f) es el nivel de energía en el que la mitad de los niveles de energía posibles de la banda están ocupados por electrones. Es el nivel de energía donde la probabilidad de hallar un electrón es 1/2. Cuando los electrones ceden

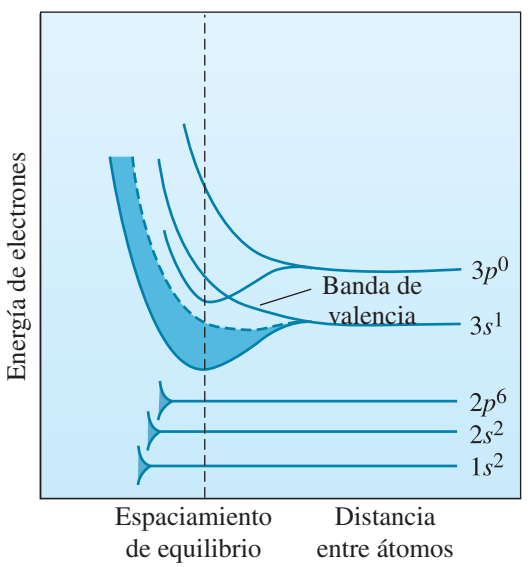


Figura 19-3 Estructura de bandas simplificada para el sodio. Los niveles de energía se ensanchan en bandas. La banda $3s$, que está llena de electrones sólo a la mitad, provoca la conducción en el sodio. Observe que los niveles de energía de los orbitales en los niveles $1s$, $2s$ y $2p$ no se dividen en el espaciamiento de equilibrio para el sodio.

energía, se excitan hacia los niveles vacíos de más alta energía. El ascenso de los portadores hacia niveles más altos de energía hace posible la conducción eléctrica.

Estructura de bandas del magnesio y otros metales

El magnesio y otros metales de la columna 2A de la tabla periódica tienen dos electrones en su banda *s* más exterior. Estos metales tienen una alta conductividad porque la banda *p* se traslapa con la banda *s* en el espaciamiento interatómico de equilibrio. Este traslape permite que los electrones sean excitados hacia el número mayor de niveles de energía desocupados en la banda combinada 3*s* y 3*p*. El traslape de las bandas 3*s* y 3*p* en el aluminio y oros metales de la columna 3B da un efecto similar.

En los metales de transición, incluyendo desde escandio hasta níquel, una banda 3*d* no llena se traslapa con la banda 4*s*. Este traslape produce niveles de energía en los que se pueden excitar electrones; no obstante, complejas interacciones entre las bandas impiden que la conductividad sea tan alta como en algunos de los mejores conductores. En el cobre, la banda interior 3*d* está llena y las capas electrónicas internas del átomo contienen fuertemente a estos electrones. En consecuencia, hay poca interacción entre los electrones de las bandas 4*s* y 3*d*, y el cobre tiene una alta conductividad. Se encuentra una situación similar para la plata y el oro.

Estructura de bandas de semiconductores y aislantes

Los elementos del grupo 4 —carbono (diamante), silicio, germanio y estaño— contienen dos electrones en su capa exterior *p* y tienen una valencia de cuatro. Con base en la explicación de la sección anterior, se podría esperar que estos elementos tuvieran alta conductividad, debido a que la banda *p* no está llena, pero este comportamiento no se observa.

Estos elementos están enlazados de manera covalente; en consecuencia, los electrones de las bandas exteriores *s* y *p* están rígidamente unidos a los átomos. El enlace covalente produce un cambio complejo en la estructura de las bandas. Los niveles 2*s* y 2*p* de los átomos de carbono en el diamante pueden contener hasta ocho electrones, pero sólo hay cuatro electrones de valencia disponibles. Cuando los átomos de carbono se unen para formar diamante sólido, los niveles 2*s* y 2*p* interaccionan y producen dos bandas (figura 19-4). Cada una de las bandas híbridas puede contener 4*N* electrones. Como hay sólo 4*N* electrones disponibles, la banda inferior (o de **valencia**) está llena por completo, mientras que la banda superior (o de **conducción**) está vacía a 0 K.

Una gran **brecha de energía** o **brecha de banda** (E_g) separa la banda de valencia de la banda de conducción en el diamante ($E_g \sim 5.5$ eV). Pocos electrones poseen suficiente energía para saltar

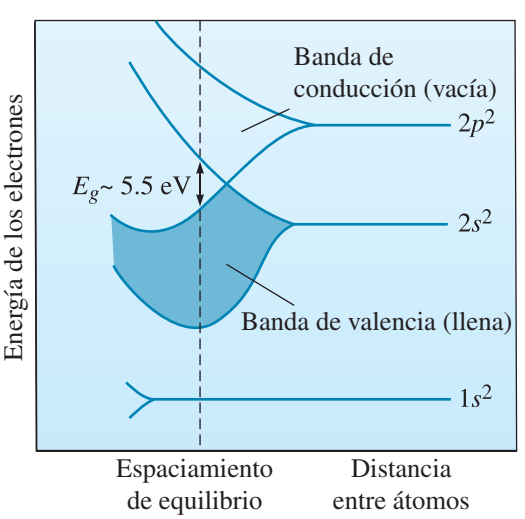


Figura 19-4 Estructura de las bandas del carbono en forma de diamante. Los niveles 2*s* y 2*p* se combinan para formar dos bandas híbridas separadas por una brecha de energía, E_g.

la zona prohibida hasta la banda de conducción. Por lo tanto, el diamante tiene una conductividad eléctrica de menos de 10^{-18} ohm$^{-1} \cdot$ cm^{-1}. Otros materiales enlazados de manera covalente o iónica tienen una estructura de banda similar y, al igual que el diamante, son malos conductores de electricidad. Un incremento de temperatura proporciona la energía requerida para que los electrones superen la brecha de energía. Por ejemplo, la conductividad eléctrica del nitruro de boro aumenta de unos 10^{-13} a temperatura ambiente a 10^{-4} ohm$^{-1} \cdot$ cm^{-1} a 800°C.

La figura 19-5 muestra un diagrama de la estructura de bandas de los metales, semiconductores y aislantes comunes. Las distintas dependencias en la temperatura de las conductividades de los metales y semiconductores son una consecuencia de sus estructuras de banda diferentes. En un metal hay una gran cantidad disponible de electrones (aproximadamente 10^{23} por centímetro cúbico, o uno por átomo) a cualquier temperatura. Una cantidad de energía casi infinitesimalmente pequeña suministrada a los electrones hará que pasen a los estados no ocupados donde pueden participar en la conducción. En un semiconductor a 0 K, la banda de valencia está completamente llena y la banda de conducción completamente vacía; el semiconductor no realiza ninguna conducción. A medida que aumenta la temperatura, el suministro de electrones se incrementa exponencialmente, debido a que la energía térmica libera un número cada vez mayor de electrones desde los enlaces covalentes, haciendo que los electrones estén disponibles para la conducción, y encontramos que la resistividad de un semiconductor disminuye con el aumento de la temperatura. En silicio puro hay cerca de 10^{10} electrones libres por centímetro cúbico a temperatura ambiente, o alrededor de 10^{13} veces menos que en un metal. Por consiguiente, una distinción importante entre los metales y semiconductores es que la conductividad de los semiconductores *aumenta* con la temperatura, a medida que más y más electrones ascienden a la banda de conducción desde la banda de valencia. La conductividad de casi todos los metales, por el contrario, *disminuye* con el aumento de la temperatura. Esto se debe a que el número de electrones que ya están disponibles comienza a dispersarse más (es decir, una temperatura creciente reduce la movilidad). Analizaremos esto más adelante en el capítulo.

Aun cuando el germanio (Ge), el silicio (Si) y el α-Sn tengan la misma estructura cristalina y la misma estructura de bandas que el diamante, sus brechas de energía son más pequeñas. De hecho, en el α-Sn es tan pequeña ($E_g = 0.1$ eV) que el α-Sn se comporta como un metal. La brecha de energía es un poco mayor en el silicio ($E_g = 1.1$ eV) y en el germanio ($E_g = 0.67$ eV); estos elementos se comportan como semiconductores. En general, se considera a los materiales con una brecha de banda mayor que 4.0 eV como aislantes, dieléctricos o no conductores; los materiales con una brecha de banda menor que 4.0 eV se consideran semiconductores.

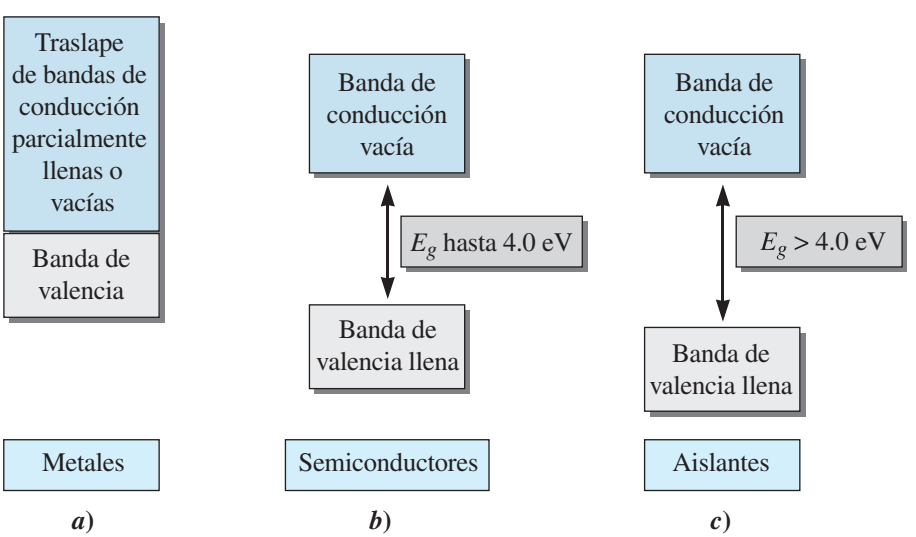


Figura 19-5 Esquema de estructuras de bandas para *a*) metales, *b*) semiconductores y *c*) dieléctricos o aislantes. (Se supone una temperatura de 0 K.)

19-3 Conductividad de metales y aleaciones

La conductividad de un metal puro y sin defectos es determinada por la estructura electrónica de los átomos, pero esta conductividad se puede cambiar al cambiar la movilidad, μ, de los portadores. Recuerde que la movilidad es proporcional al promedio de la velocidad de deriva $\bar{v}$. La velocidad de deriva media es la velocidad con la que los portadores de carga se mueven en la dirección que dicta el campo aplicado. Las trayectorias de los electrones están sujetas a la influencia de campos internos debidos a los átomos en el sólido e imperfecciones en la red. Cuando estos campos internos influyen en la trayectoria de un electrón, la velocidad de deriva disminuye (y, por lo tanto, también disminuye la movilidad de los portadores de carga). La **trayectoria libre media** (λ_e) de los electrones se define como

$$\lambda_e = \tau\bar{v} \tag{19-6}$$

El promedio de tiempo o tiempo medio entre colisiones es τ. La trayectoria libre media define la distancia promedio entre colisiones; una trayectoria libre media larga permite movilidades mayores y conductividades más altas.

Efecto de la temperatura

Cuando aumenta la temperatura de un metal, la energía térmica hace que aumenten las amplitudes de la vibración de los átomos (figura 19-6). Esto provoca un incremento en la *sección transversal de dispersión* de los átomos o defectos de la red. En esencia, los átomos y defectos actúan como objetivos más grandes para las interacciones con electrones, y las interacciones ocurren con más frecuencia. Entonces disminuyen la trayectoria libre media y la

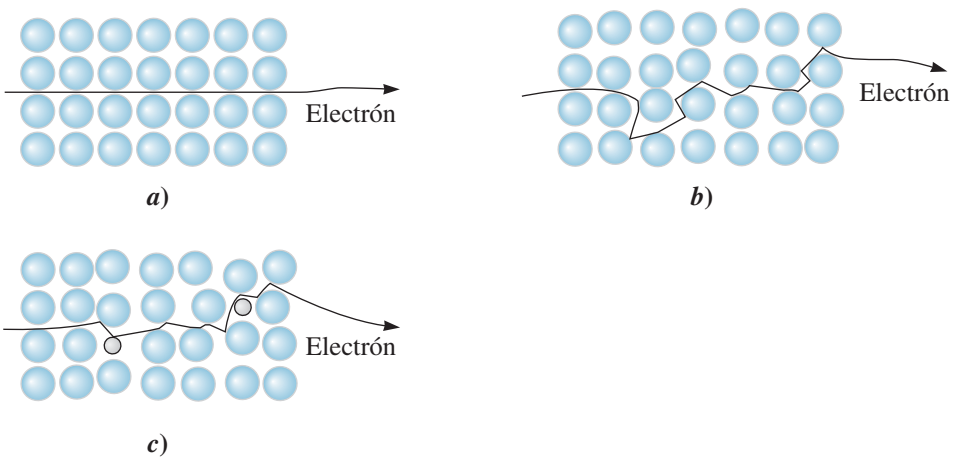


Figura 19-6 Movimiento de un electrón a través de *a*) un cristal perfecto, *b*) un cristal calentado a alta temperatura y *c*) un cristal que contiene defectos a nivel atómico. La dispersión de los electrones reduce la movilidad y la conductividad.

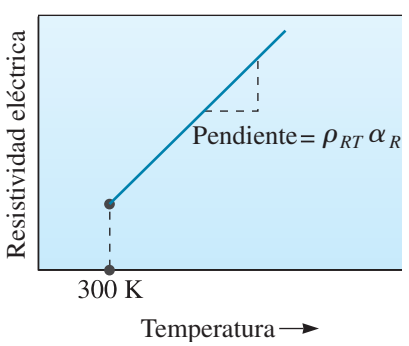


Figura 19-7 Efecto de la temperatura en la resistividad eléctrica de un metal con una estructura cristalina perfecta.

Tabla 19-3 Coeficiente de resistividad por temperatura α_R para metales seleccionados

Metal	Resistividad a temperatura ambiente (ohm · cm)	Coeficiente de resistividad por temperatura (α_R) [ohm/(ohm ·°C)]
Be	4.0×10^{-6}	0.0250
Mg	4.45×10^{-6}	0.0037
Ca	3.91×10^{-6}	0.0042
Al	2.65×10^{-6}	0.0043
Cr	12.90×10^{-6} (0°C)	0.0030
Fe	9.71×10^{-6}	0.0065
Co	6.24×10^{-6}	0.0053
Ni	6.84×10^{-6}	0.0069
Cu	1.67×10^{-6}	0.0043
Ag	1.59×10^{-6}	0.0041
Au	2.35×10^{-6}	0.0035
Pd	10.8×10^{-6}	0.0037
W	5.3×10^{-6} (27°C)	0.0045
Pt	9.85×10^{-6}	0.0039

(*Basado en* Handbook of Electromagnetic Materials: Monolithic and Composite Versions And Their Applications *de P.S. Neelkanta, Taylor & Francis, 1995.*)

movilidad de los electrones y aumenta la resistividad. El cambio en la resistividad de un metal puro como función de la temperatura puede estimarse con la ecuación

$$\rho = \rho_{RT}(1 + \alpha_R \Delta T) \tag{19-7}$$

donde ρ es la resistividad a cualquier temperatura T, ρ_{RT} es la resistividad a temperatura ambiente (por ejemplo, 25°C), $\Delta T = (T - \rho_{RT})$ es la diferencia entre la temperatura de interés y la temperatura ambiente, y α_R es el *coeficiente de resistividad por temperatura.* La relación entre la resistividad y la temperatura es lineal en un amplio margen de temperaturas (figura 19-7). En la tabla 19-3 se dan ejemplos del coeficiente de resistividad por temperatura de varios metales. El ejemplo siguiente ilustra la forma en que se calcula la resistividad del cobre puro.

Ejemplo 19-3 *Resistividad del cobre puro*

Calcule la conductividad eléctrica del cobre puro a *a*) 400°C y *b*) −100°C.

SOLUCIÓN

La resistividad del cobre a temperatura ambiente es 1.67×10^{-6} ohm · cm, y el coeficiente de resistividad por temperatura es 0.0043 ohm/(ohm ·°C). (Vea la tabla 19-3.)

a) A 400°C:

$$\rho = \rho_{RT}\,(1 + \alpha_R \Delta T) = (1.67 \times 10^{-6})[1 + 0.0043(400 - 25)]$$

$$\rho = 4.363 \times 10^{-6}\,\text{ohm} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma = 1/\rho = 2.29 \times 10^{5}\,\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

b) A −100°C:

$$\rho = (1.67 \times 10^{-6})[1 + 0.0043(-100 - 25)] = 7.724 \times 10^{-7}\,\text{ohm} \cdot \text{cm}$$

$$\sigma = 1.29 \times 10^{6}\,\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

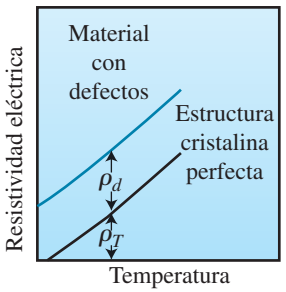


Figura 19-8 La resistividad eléctrica de un metal se debe a una aportación constante de imperfecciones ρ_d y a una aportación de la temperatura variable ρ_T.

Efecto de imperfecciones a nivel atómico

Las imperfecciones en las estructuras de cristal dispersan los electrones, reduciendo la movilidad y la conductividad del metal (figura 19-6*c*). Por ejemplo, el incremento de la resistividad debido a átomos en una solución sólida para soluciones diluidas es

$$\rho_d = b(1 - x)x \tag{19-8}$$

donde ρ_d es el incremento de la resistividad debido a los defectos, x la fracción atómica de la impureza o átomos de solución sólida presentes y b el coeficiente de resistividad de los defectos. Del mismo modo, las vacancias, dislocaciones y límites de grano reducen la conductividad del metal. Cada uno de los defectos contribuye al incremento de la resistividad del metal. Por lo tanto, la resistividad total es

$$\rho = \rho_T + \rho_d \tag{19-9}$$

donde ρ_d es igual a las aportaciones de todos los defectos. La ecuación 19-9 se conoce como **regla de Matthiessen**. El efecto de los defectos es *independiente* de la temperatura (figura 19-8).

Efecto del procesamiento y del endurecimiento

Los mecanismos de endurecimiento y las técnicas de procesamiento de los metales afectan las propiedades eléctricas de un metal en diferentes formas (tabla 19-4). El endurecimiento por solución sólida *no* es una buena

Tabla 19-4 Efecto de la aleación, el endurecimiento y las técnicas de procesamiento en la conductividad eléctrica del cobre y sus aleaciones

Aleación	$\frac{\sigma_{\text{aleación}}}{\sigma_{\text{Cu}}} \times 100$	Observaciones
Cobre recocido puro	100	Pocos defectos para dispersar electrones; la trayectoria libre media es larga.
Cobre puro deformado 80%	98	Numerosas dislocaciones, pero debido a la naturaleza enredada de las redes de dislocaciones la trayectoria libre media todavía es larga.
Cu-0.7% Al_2O_3 endurecido por dispersión	85	La fase dispersa no está tan compactada como los átomos de solución sólida, ni es coherente, como en el endurecimiento por envejecimiento. Entonces, el efecto en la conductividad es pequeño.
Cu-2% Be tratado por solución	18	La aleación es de una fase, pero la pequeña cantidad de endurecimiento por solución sólida del berilio supersaturado reduce en gran medida la conductividad.
Cu-2% Be envejecido	23	Durante el endurecimiento, el berilio sale de la red de cobre para producir un precipitado coherente. El precipitado no interfiere con la conductividad tanto como los átomos de solución sólida.
Cu-35% Zn	28	Esta aleación es una solución sólida endurecida por zinc, que tiene un radio atómico cercano al del cobre. La conductividad es baja, pero no tanto como cuando el berilio está presente.

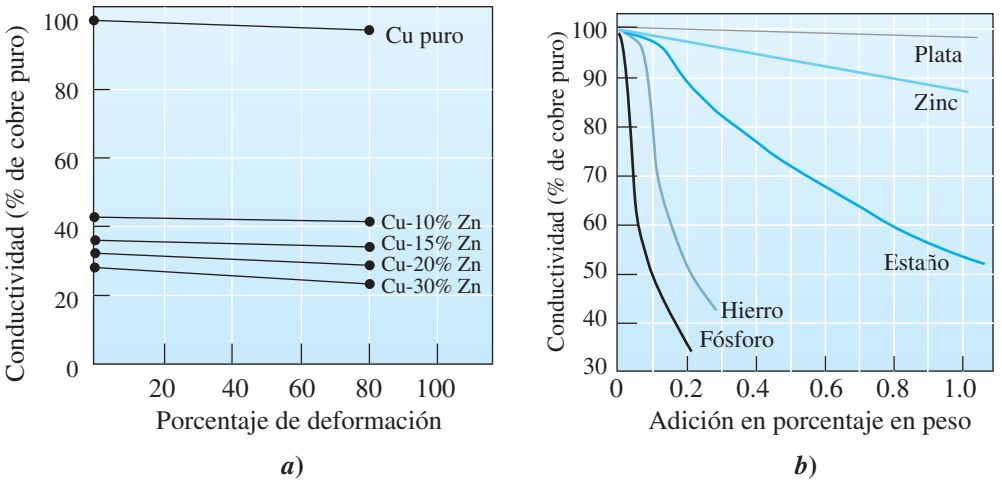


Figura 19-9 *a*) Efecto del endurecimiento por solución sólida y por trabajo en frío en la conductividad eléctrica del cobre, y *b*) efecto de la adición de elementos seleccionados en la conductividad eléctrica del cobre.

forma de obtener alta resistencia en metales destinados a tener altas conductividades. Las trayectorias libres medias son cortas, debido a la distribución aleatoria de los átomos intersticiales o sustitucionales. La figura 19-9 presenta el efecto del zinc y otros elementos de aleación en la conductividad del cobre; cuando aumenta la cantidad de un elemento de aleación, la conductividad se reduce de forma considerable.

El endurecimiento por envejecimiento y por dispersión reduce la conductividad menos que el endurecimiento por solución sólida, porque hay una trayectoria libre media más larga entre precipitados, en comparación con la trayectoria entre defectos puntuales. El endurecimiento por deformación y el control del tamaño de grano tienen incluso menos efecto sobre la conductividad (figura 19-9 y tabla 19-4). Como las dislocaciones y los límites de grano están más alejados entre sí que los átomos de solución sólida, hay grandes volúmenes de metal que tienen una trayectoria libre media larga. En consecuencia, el trabajo en frío es una forma eficiente de incrementar la resistencia de un conductor metálico sin afectar gravemente las propiedades eléctricas del material. Además, los efectos del trabajo en frío en la conductividad pueden eliminarse por medio de un tratamiento térmico de recuperación a baja temperatura, con el cual se restaura la buena conductividad, al mismo tiempo que se retiene la resistencia.

Conductividad de aleaciones

En general, las aleaciones tienen resistividades más altas que los metales puros por la dispersión de electrones debida a las aleaciones agregadas. Por ejemplo, la resistividad del Cu puro a temperatura ambiente es $\sim 1.67 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot$ cm y la del oro puro es $\sim 2.35 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot$ cm. La resistividad de una aleación de 35% Au-65% Cu a temperatura ambiente es mucho más alta, $\sim 12 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot$ cm. Un tratamiento térmico puede ordenar los átomos en aleaciones para reducir la resistividad. En comparación con metales puros, la resistividad de las aleaciones tiende a ser estable respecto a la variación de temperatura. Las aleaciones de resistencia relativamente alta, como el nicromo ($\sim$80% Ni − 20% Cr), pueden usarse como elementos calefactores. Ciertas aleaciones de Bi-Sn-Pb-Cd se usan para hacer fusibles eléctricos debido a sus bajas temperaturas de fusión.

19-4 Semiconductores

En el grupo 4B de la tabla periódica se encuentran los semiconductores elementales, entre los cuales están el germanio y el silicio. Los semiconductores compuestos están formados por elementos de los grupos 2B y 6B de la tabla periódica (por ejemplo, CdS, CdSe, CdTe, HgCdTe, etc.) y se conocen como semiconductores II-VI (dos-seis). También pueden formarse al combinar elementos de los grupos 3B y 5B de la tabla periódica (por ejemplo, GaN, GaAs, AlAs, AlP, InP, etc.). Estos últimos se conocen como semiconductores III-V (tres-cinco).

Tabla 19-5 Propiedades de semiconductores de uso común a temperatura ambiente

Semiconductor	Brecha de banda (eV)	Movilidad de electrones (μ_n) $\left(\frac{cm^2}{V\text{-}s}\right)$	Movilidad de orificios (μ_p)	Constante dieléctrica (k)	Resistividad ($\Omega \cdot cm$) $\left(\frac{cm^2}{V\text{-}s}\right)$	Densidad $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	Temperatura de fusión (°C)
Silicio (Si)	1.11	1350	480	11.8	2.5×10^5	2.33	1415
Silicio amorfo (a:Si:H)	1.70	1	10^{-2}	~11.8	10^{10}	~2.30	—
Germanio (Ge)	0.67	3900	1900	16.0	43	5.32	936
SiC (α)	2.86	500		10.2	10^{10}	3.21	2830
Arseniuro de galio (GaAs)	1.43	8500	400	13.2	4×10^8	5.31	1238
Diamante	~5.50	1800	1500	5.7	$> 10^{18}$	3.52	~3550

Un **semiconductor intrínseco** es aquel con propiedades que no están controladas por sus impurezas. Un **semiconductor extrínseco** (tipo *n* o *p*) es el preferido para dispositivos, ya que sus propiedades son estables con respecto a la temperatura y pueden controlarse usando la implantación de iones o la difusión de impurezas conocidas como dopantes o contaminantes. Los materiales semiconductores, incluyendo el silicio y el germanio, son las piezas fundamentales para la fabricación de numerosos dispositivos electrónicos. Estos materiales tienen una conductividad eléctrica que se puede controlar con facilidad y cuando se combinan de forma apropiada pueden actuar como interruptores, amplificadores o dispositivos para almacenar información. Las propiedades de algunos de los semiconductores que se encuentran con más frecuencia se listan en la tabla 19-5.

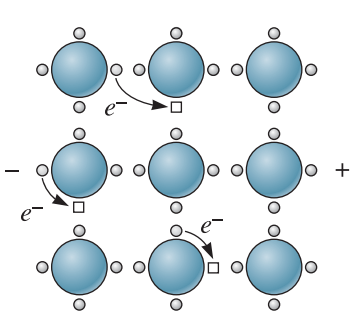
Como ya se vio en la sección 19-2, cuando los átomos de un semiconductor se unen para formar un sólido, se forman dos bandas de energía (figura 19-5*b*). A 0 K, los niveles de energía de la banda de valencia están completamente llenos, ya que estos son los estados de energía más bajos para los electrones. La banda de valencia se separa de la banda de conductividad por una brecha de banda. A 0 K, la banda de conducción está vacía.

La brecha de energía E_g entre las bandas de valencia y de conducción en los semiconductores es relativamente pequeña (figura 19-5). Como resultado, cuando aumenta la temperatura, algunos electrones poseen suficiente energía térmica para ascender de la banda de valencia a la banda de conducción. Los electrones excitados dejan tras de sí niveles de energía desocupados, u orificios, en la banda de valencia. Cuando un electrón se mueve para llenar un orificio, se forma otro orificio; en consecuencia, los orificios parecen actuar como electrones de carga positiva y llevan una carga eléctrica. Cuando se aplica un voltaje al material, los electrones de la banda de conducción se aceleran hacia el terminal positivo, en tanto que los orificios de la banda de valencia se mueven hacia el terminal negativo (figura 19-10). La corriente es, por lo tanto, conducida por el movimiento tanto de electrones como de orificios en los semiconductores.

La conductividad es determinada por el número de electrones y orificios con base en la ecuación

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \tag{19-10}$$

donde n es la concentración de electrones en la banda de conducción, p la concentración de orificios en la banda de valencia, y μ_n y μ_p son las movilidades de electrones y orificios, respectivamente (tabla 19-5). Esta ecuación es la misma que la ecuación 19-5*b*.



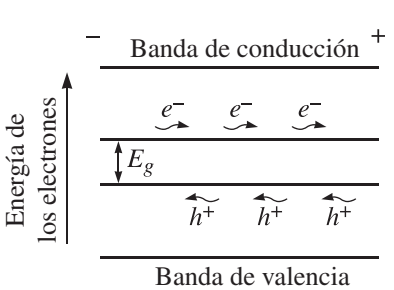


Figura 19-10 Cuando se aplica un voltaje a un semiconductor, los electrones se mueven a través de la banda de conducción, en tanto que los orificios se mueven a través de la banda de valencia en la dirección opuesta.

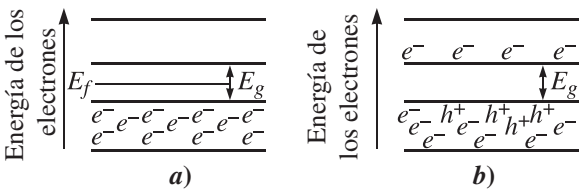


Figura 19-11 Distribución de electrones y orificios en las bandas de valencia y de conducción *a*) al cero absoluto y *b*) a una temperatura alta.

En los semiconductores intrínsecos, por cada electrón que asciende a la banda de conducción hay un orificio que se queda en la banda de valencia, de modo que

$$n_i = p_i$$

donde n_i y p_i son las concentraciones de electrones y orificios, respectivamente, en un semiconductor intrínseco. Por lo tanto, la conductividad de un semiconductor intrínseco es

$$\sigma = qn_i(\mu_n + \mu_p) \tag{19-11}$$

En los semiconductores intrínsecos se controla el número de portadores de carga y, en consecuencia, la conductividad eléctrica, al controlar la temperatura. A la temperatura de cero absoluto, todos los electrones están en la banda de valencia, mientras que todos los niveles de la banda de conducción están desocupados [figura 19-11*a*)]. Cuando aumenta la temperatura, hay una mayor probabilidad de que se ocupe un nivel de energía de la banda de conducción (e igual probabilidad de que se desocupe un nivel de la banda de valencia, o que un orificio se encuentre presente) [figura 19-11*b*)]. El número de electrones en la banda de conducción, que es igual al número de orificios en la banda de valencia, está dado por

$$n = n_i = p_i = n_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right) \tag{19-12a}$$

donde n_0 está dado por

$$n_0 = 2\left(\frac{2\pi k_B T}{h^2}\right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \tag{19-12b}$$

En estas ecuaciones, k_B y h son las constantes de Boltzmann y Planck, y m_n^* y m_p^* son las masas efectivas de electrones y orificios en el semiconductor, respectivamente. Las masas efectivas explican los efectos de las fuerzas internas que alteran la aceleración de los electrones en un sólido con respecto a los electrones en un vacío. Para Ge, Si y GaAs, los valores de temperatura ambiente de n_i son 2.5×10^{13}, 1.5×10^{10} y 2×10^6 electrones/cm^3, respectivamente. El producto $n_i p_i$ permanece constante a cualquier temperatura dada para un semiconductor determinado. Esto permite calcular valores de n_i o p_i a diferentes temperaturas.

Las temperaturas más altas permiten que más electrones crucen la zona prohibida y, por lo tanto, aumente la conductividad:

$$\sigma = n_0 q(\mu_n + \mu_p) \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right) \tag{19-13}$$

Observe que tanto n_i como σ se relacionan con la temperatura por medio de una ecuación de Arrhenius, tasa $= A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$. Cuando aumenta la temperatura, la conductividad de un semiconductor también se incrementa porque habrá más portadores de carga para la conducción. Observe que, en cuanto a metales se refiere, las movilidades de los portadores disminuyen a temperaturas altas, pero esta es una dependencia mucho más débil que el incremento exponencial del número de portadores de carga. El incremento de la conductividad con la temperatura en semiconductores hace un fuerte contraste con la disminución de la conductividad de metales con una temperatura creciente (figura 19-12). No obstante, incluso a altas temperaturas la conductividad de un metal es de varios órdenes de magnitud mayor que la conductividad de un semiconductor. El ejemplo que sigue muestra el cálculo para determinar la concentración de portadores en un semiconductor intrínseco.

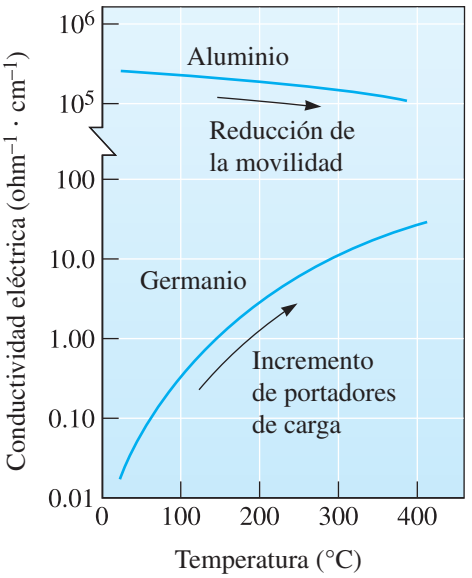


Figura 19-12 Conductividad eléctrica contra temperatura para semiconductores intrínsecos, en comparación con los metales. Observe la ruptura de la escala del eje vertical.

Ejemplo 19-4 *Concentraciones de portadores en Ge intrínseco*

Para el germanio a 25°C, estime *a*) el número de portadores de carga, *b*) la fracción del total de electrones en la banda de valencia excitados para pasar a la banda de conducción, y *c*) la constante n_0 de la ecuación 19-12*a*.

SOLUCIÓN

De la tabla 19-5, se tiene que $\rho = 43\ \Omega \cdot \text{cm}$, $\therefore = 0.0233\ \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. También se tiene que,

$$E_g = 0.67\,\text{eV},\ \mu_n = 3900\,\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}},\ \mu_p = 1900\,\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$$

$$2k_BT = 2(8.617 \times 10^{-5}\,\text{eV/K})(273\ \text{K} + 25\ \text{K}) = 0.05136\,\text{eV}\ \text{ a }\ T = 25°\text{C}$$

a) De la ecuación 19-10,

$$n = \frac{\sigma}{q(\mu_n + \mu_p)} = \frac{0.0233}{(1.6 \times 10^{-19})(3900 + 1900)} = 2.51 \times 10^{13}\,\frac{\text{electrones}}{\text{cm}^3}$$

Hay 2.51×10^{13} electrones/cm^3 y 2.51×10^{13} orificios/cm^3 que conducen carga en el germanio a temperatura ambiente.

b) El parámetro de red del germanio cúbico tipo diamante es 5.6575×10^{-8} cm.

El número total de electrones de la banda de valencia del germanio a 0 K es

$$\text{Total electrones} = \frac{(8\,\text{átomos/celda})(4\,\text{electrones/átomo})}{(5.6575 \times 10^{-8}\,\text{cm})^3/\text{celda}}$$

$$= 1.77 \times 10^{23}$$

$$\text{Fracción excitada} = \frac{2.51 \times 10^{13}}{1.77 \times 10^{23}} = 1.42 \times 10^{-10}$$

c) De la ecuación 19-12*a*,

$$n_0 = \frac{n}{\exp[-E_g/(2k_BT)]} = \frac{2.51 \times 10^{13}\,\text{portadores/cm}^3}{\exp(-0.67/0.05136)}$$

$$= 1.16 \times 10^{19}\,\text{portadores/cm}^3$$

Semiconductores extrínsecos

La dependencia en la temperatura que presenta la conductividad en los semiconductores intrínsecos es casi exponencial, pero no es útil para aplicaciones prácticas. No se puede controlar con precisión el comportamiento de un semiconductor intrínseco porque variaciones ligeras en la temperatura pueden cambiar de manera importante la conductividad. Al agregar intencionalmente un pequeño número de átomos de impurezas al material (procedimiento conocido como dopado), es posible producir un semiconductor extrínseco. La conductividad del semiconductor extrínseco depende principalmente del número de átomos de impurezas, o dopante, y en cierto rango de temperaturas es independiente de la temperatura. Esta capacidad de tener una conductividad ajustable, independiente de la temperatura, es la razón por la que casi siempre se usan semiconductores extrínsecos para fabricar dispositivos.

Semiconductores tipo *n*

Suponga que al silicio o al germanio se le agrega un átomo de impureza, por ejemplo de antimonio (que tiene una valencia de cinco). Cuatro de los electrones del átomo de antimonio participan en el proceso de enlace covalente, en tanto que el electrón adicional entra en un nivel de energía justo por debajo de la banda de conducción (figura 19-13). Como el electrón adicional no está enlazado fuertemente a los átomos, sólo se requiere de un pequeño aumento de energía, E_d, para que el electrón entre en la banda de conducción. Este nivel de energía justo por debajo de la banda de conducción se llama estado donante. Un dopante tipo *n* "dona" un electrón libre por cada átomo de impureza agregado. La brecha de energía que controla la conductividad ahora es E_d en lugar de E_g (tabla 19-6). No se crean orificios correspondientes cuando los electrones donantes entran en la banda de conducción. Aún se da el caso de que se crean pares electrón-orificio cuando la energía térmica hace que los electrones asciendan a la banda de conducción desde la banda de valencia; no obstante, el número de pares electrón-orificio es significativo sólo a altas temperaturas.

Semiconductores tipo *p*

Cuando al Si o al Ge se les agrega una impureza de galio o boro, que tiene una valencia de 3, no hay suficientes electrones para completar el proceso de enlace covalente. Se crea un orificio en la banda de valencia que pueden llenar electrones de otros lugares de la banda (figura 19-14). Los orificios actúan como "aceptantes" de electrones. Estos lugares de orificios tienen una energía un poco más alta de lo normal y crean un nivel aceptante de posibles energías de electrones justo por encima de la banda de valencia (tabla 19-6). Un electrón debe ganar una energía de sólo E_a para crear un orificio en la banda de valencia. El orificio entonces porta carga. Este se conoce como semiconductor tipo *p*.

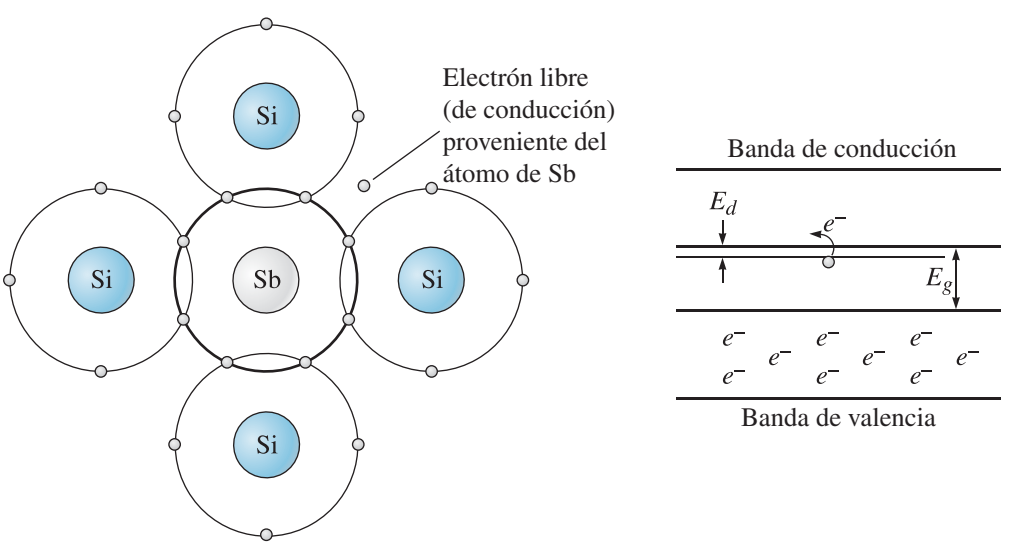


Figura 19-13 Cuando al silicio se le agrega un átomo dopante con valencia mayor de 4, se introduce un electrón adicional y se crea un estado donador de energía. Ahora los electrones se excitan más fácilmente hacia la banda de conducción.

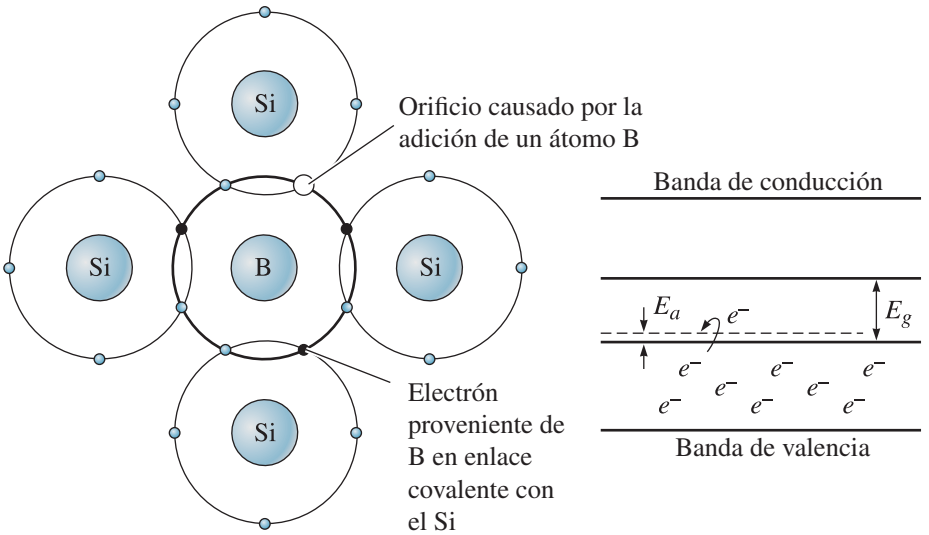


Figura 19-14 Cuando un átomo dopante con valencia menor de 4 se sustituye en la estructura de silicio, se introduce un orificio en la estructura y se crea un nivel de energía aceptante justo por encima de la banda de valencia.

Tabla 19-6 Niveles de energía donantes y aceptantes (en electrón volts) cuando se contaminan semiconductores de silicio y germanio

	Silicio		Germanio	
Dopante	E_d	E_a	E_d	E_a
P	0.045		0.0120	
As	0.049		0.0127	
Sb	0.039		0.0096	
B		0.045		0.0104
Al		0.057		0.0102
Ga		0.065		0.0108
In		0.160		0.0112

Neutralidad de carga

En un semiconductor extrínseco tiene que haber neutralidad eléctrica generalizada. De este modo, la suma del número de átomos donantes (N_d) y de orificios por unidad de volumen (p_{ext}) (ambos están cargados positivamente) es igual al número de átomos aceptantes (N_a) y de electrones por unidad de volumen (n_{ext}) (ambos están cargados negativamente):

$$p_{\text{ext}} + N_d = n_{\text{ext}} + N_a$$

En esta ecuación, n_{ext} y p_{ext} son las concentraciones de electrones y orificios en un semiconductor extrínseco.

Si el semiconductor extrínseco es tipo *n* fuertemente dopante (es decir, $N_d >> n_i$), entonces $n_{\text{ext}} \sim N_d$. Del mismo modo, si hay un semiconductor aceptante fuertemente dopante (tipo *p*), entonces $N_a >> p_i$ y por consiguiente $p_{\text{ext}} \sim N_a$. Esto es importante, ya que nos indica que al agregar una cantidad considerable de dopante se puede dominar la conductividad de un semiconductor si se controla la concentración del dopante.

En la figura 19-15 se ven los cambios en la concentración de portadores por efecto de la temperatura. A partir de esto, los cambios en la conductividad aproximada en un semiconductor extrínseco son fáciles de seguir. Cuando la temperatura es demasiado baja, los átomos donantes o aceptantes no están ionizados y, por lo tanto, la conductividad es muy pequeña. Conforme la temperatura empieza a aumentar, los electrones (u orificios) aportados por los donantes (o aceptantes) estarán disponibles para la conducción.

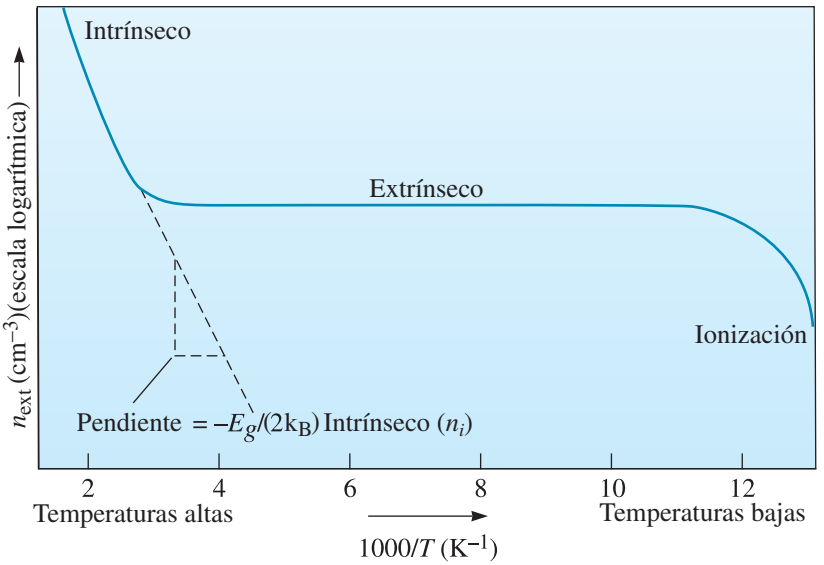


Figura 19-15 Efecto de la temperatura sobre la concentración de portadores de un semiconductor tipo *n*. A temperaturas bajas, los átomos donadores o aceptantes no están ionizados. A medida que aumenta la temperatura, el proceso de ionización se completa y la concentración de portadores se incrementa hasta un nivel determinado por el grado de dopado. La conductividad entonces se conserva esencialmente sin cambio, hasta que la temperatura llega a un grado tan alto que los portadores generados térmicamente empiezan a dominar. El efecto de los dopantes se pierde a temperaturas muy altas y el semiconductor presenta, fundamentalmente, un comportamiento "intrínseco".

A temperaturas suficientemente altas, la conductividad es casi independiente de la temperatura (región etiquetada como extrínseca). El valor de la conductividad en el que ocurre la meseta depende del nivel de dopado. Cuando la temperatura llega a ser demasiado alta, el comportamiento se parece al de un semiconductor intrínseco, ya que el efecto de los dopantes se pierde. En este análisis no se consideraron los efectos de la concentración de dopantes en la movilidad de los electrones y orificios ni la dependencia en la temperatura de la brecha de banda. A temperaturas muy altas (que no se muestran en la figura 19-15), la conductividad *disminuye* de nuevo conforme domina la dispersión de los portadores.

Ejemplo 19-5 *Diseño de un semiconductor*

Diseñe un semiconductor tipo *p* con base de silicio que proporcione una conductividad constante de 100 $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ en un rango de temperaturas. Compare la concentración necesaria de átomos aceptantes en el Si con la concentración de átomos de Si.

SOLUCIÓN

Para obtener la conductividad deseada, se debe contaminar el silicio con átomos que tengan una valencia de +3, agregando suficiente dopante para obtener el número requerido de portadores de carga. Si se supone que el número de portadores intrínsecos es pequeño en comparación con la concentración de contaminante, entonces

$$\sigma = N_a q \mu_p$$

donde $\sigma = 100\ \text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ y $\mu_p = 480\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Observe que las movilidades de electrones y orificios son propiedades del material anfitrión (es decir, silicio en este caso) y no de la especie dopante. Si se recuerda que un coulomb puede expresarse como ampere-segundos y el voltaje como ampere-ohm, el número de portadores de carga necesarios es

$$N_a = \frac{\sigma}{q\mu_p} = \frac{100\ \text{ohm}^{-1}\,\text{cm}^{-1}}{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{A} \cdot \text{s})[480\ \text{cm}^2/(\text{A} \cdot \text{ohm} \cdot \text{s})]} = 1.30 \times 10^{18}\ \text{átomos aceptantes/cm}^3$$

Suponga que la constante de red del Si permanece sin cambios como resultado del dopado o contaminación:

$$N_a = \frac{(1\,\text{orificio/átomos dopantes})(x\,\text{átomos dopantes/átomos de Si})(8\,\text{átomos de Si/celda unitaria})}{(5.4307 \times 10^{-8}\,\text{cm})^3/\text{celda unitaria}}$$

$$x = (1.30 \times 10^{18})(5.4307 \times 10^{-8})^3/8 = 26 \times 10^{-6}\,\text{átomos dopantes/átomos de Si}$$

o 26 átomos dopantes/10^6 átomos de Si

Los dopantes posibles incluyen boro, aluminio, galio e indio. Los químicos de alta pureza y unas condiciones ambientales limpias son esenciales para el procesamiento, dado que se requieren 26 átomos dopantes por millón de átomos de silicio.

Muchos otros materiales que normalmente son aislantes (porque la brecha de banda es demasiado grande) se pueden hacer semiconductores si se les altera. Ejemplos de esto son $BaTiO_3$, ZnO, TiO_2 y muchos otros óxidos. Así, el concepto de contaminantes tipo *n* y tipo *p* no se limita a Si, Ge, GaAs, etc. Por ejemplo, es posible contaminar el $BaTiO_3$ y hacer $BaTiO_3$ tipo *n* o tipo *p*. Estos materiales son útiles para numerosas aplicaciones de sensores, como los **termistores**.

Semiconductores de brecha de banda directa e indirecta

En un semiconductor de brecha de banda directa, un electrón puede ascender desde la banda de conducción a la banda de valencia sin cambiar el momento del electrón. Un ejemplo de un semiconductor de brecha de banda directa es el GaAs. Cuando el electrón excitado regresa a la banda de valencia, los electrones y orificios se combinan para producir luz. A esto se le conoce como **recombinación radiante**. Así, los materiales de brecha de banda directa como el GaAs y las soluciones sólidas de éstos (por ejemplo, GaAs-AlAs, etc.) se usan para hacer diodos emisores de luz (LED) de diferentes colores. La brecha de banda de los semiconductores puede ajustarse usando soluciones sólidas. El cambio en la brecha de banda produce un cambio en la longitud de onda; es decir, la frecuencia del color (ν) está relacionada con la brecha de banda E_g cuando $E_g = h\nu$, donde h es la constante de Planck. Como se obtiene un efecto óptico usando un material electrónico, a veces los materiales de brecha de banda directa se conocen como materiales optoelectrónicos (capítulo 21). Muchos dispositivos láser y LED se han perfeccionado usando estos materiales. Los LED que emiten luz en la escala infrarroja se usan en sistemas de comunicaciones por fibra óptica para convertir las ondas de luz en pulsos eléctricos. Equipos láser de diferentes colores, por ejemplo el láser azul que usa GaN, se han desarrollado usando materiales de brecha de banda directa.

En un semiconductor de brecha de banda indirecta (por ejemplo, Si, Ge y GaP), los electrones no pueden ascender a la banda de valencia sin un cambio en su momento. Como consecuencia, en materiales que tienen una brecha de banda indirecta (por ejemplo, silicio), no es posible obtener emisión de luz. En vez de ello, los electrones y orificios se combinan para producir calor que se disipa dentro del material. Esto se conoce como **recombinación no radiante**. Observe que los materiales con brecha de banda tanto directa como indirecta pueden contaminarse para formar semiconductores tipo *n* o tipo *p*.

19-5 Aplicaciones de los semiconductores

Se fabrican diodos, transistores, láseres y LED usando semiconductores. La **unión *p-n*** se utiliza en muchos de estos dispositivos (por ejemplo, en los transistores). La creación de una región tipo *n* en un semiconductor tipo *p* (o viceversa) forma una unión *p-n* [figura 19-16*a*)]. La región tipo *n* contiene un número relativamente grande de electrones libres, mientras que la región tipo *p* contiene un número relativamente grande de orificios libres. Este gradiente de concentración entre las regiones tipo *p* y tipo *n* provoca la difusión de electrones desde el material tipo *n* al material tipo *p*, así como la difusión de orificios del material tipo *p* al material tipo *n*. En el punto donde se unen las regiones *p* y *n*, los electrones libres del material tipo *n* se recombinan con los orificios del material tipo *p*. Esto

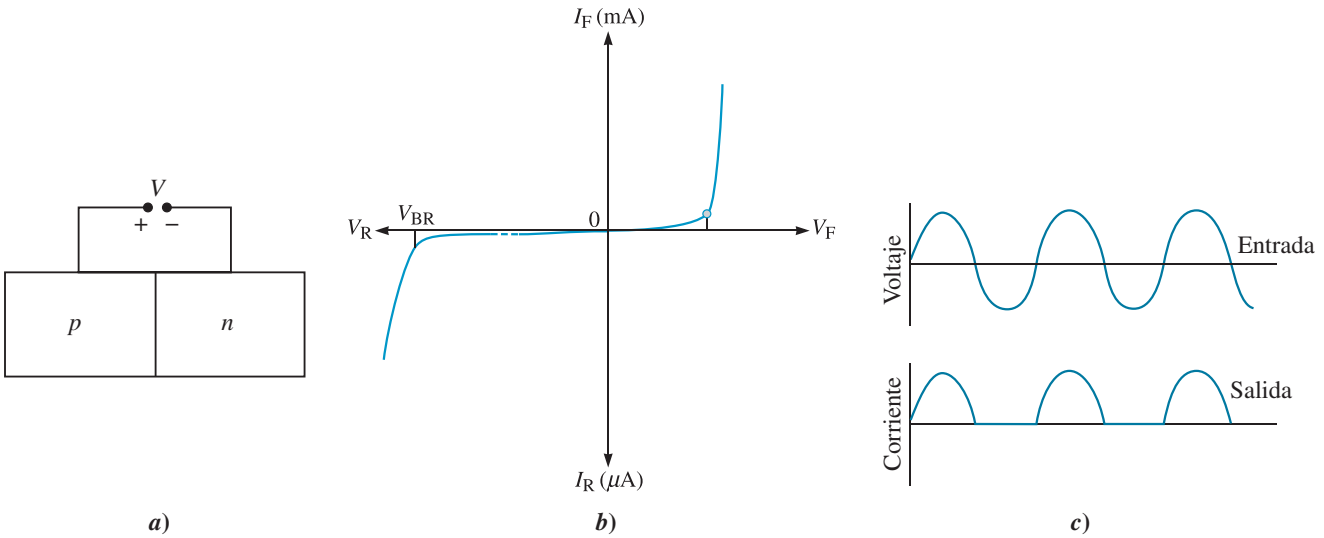


Figura 19-16 *a*) Una unión *p*-*n* bajo polarización directa. *b*) Curva característica para una unión *p*-*n*. Observe las diferentes escalas en los cuadrantes primero y tercero. A voltajes de polarización inversa suficientemente altos, ocurre una "ruptura" y pueden pasar grandes corrientes. Por lo general esto destruye los dispositivos. *c*) Si se aplica una señal alterna, ocurre una rectificación y sólo la mitad de la señal de entrada pasa por el rectificador. [*Basado en Thomas L. Floyd,* Electronic Devices *(Conventional Flow Version), 6a. ed., Pearson Education, 2002*.]

crea una *región agotada* en la unión donde el número de portadores de carga disponibles es bajo y, por consiguiente, la resistividad es alta.

En consecuencia, se desarrolla un campo eléctrico debido a la distribución de iones positivos expuestos en el lado *n* de la unión y otros iones negativos expuestos en el lado *p* de la unión. El campo eléctrico impide más difusión.

Desde el punto de vista eléctrico, la unión *p*-*n* está conduciendo cuando el lado *p* está conectado a un voltaje positivo. Esta condición de **polarización directa** se muestra en la figura 19-16*a*. El voltaje aplicado directamente neutraliza el campo eléctrico en la región agotada, permitiendo que los electrones del lado *n* se difundan por la región agotada hacia el lado *n*. Cuando se aplica una polarización negativa al lado *p* de una unión *p*-*n* (**polarización inversa**), la unión *p*-*n* no permite que pase mucha corriente. La región agotada simplemente se hace más grande, porque queda más vacía de portadores. Cuando no se aplica polarización, no pasa corriente por la unión *p*-*n*. La corriente directa puede ser de hasta unos pocos miliamperes, en tanto que la corriente de polarización inversa es de unos pocos nanoamperes.

Las curvas características de corriente-voltaje (*I*-*V*) de una unión *p*-*n* se ilustran en la figura 19-16*b*). Como la unión *p*-*n* permite que la corriente fluya sólo en una dirección, pasa sólo la mitad de una corriente alterna, por lo cual convierte la corriente alterna en corriente directa [figura 19-6*c*)]. Estas uniones se llaman **diodos rectificadores**.

Transistores de unión bipolar

Hay dos tipos de **transistores** basados en uniones *p*-*n*. El término transistor se deriva de dos palabras: "transferencia" y "resistor". Un transistor se puede usar como interruptor o amplificador. Un tipo de transistor es el *transistor de unión bipolar* (TUB). En la era de las macrocomputadoras, los transistores de unión bipolar solían usarse en unidades de procesamiento central. Un transistor de unión bipolar es un dispositivo tipo emparedado o sándwich de materiales semiconductores, ya sea *n*-*p*-*n* o *p*-*n*-*p*, como muestra la figura 19-17*a*). Hay tres zonas en el transistor: el emisor, la base y el colector. Al igual que en la unión *p*-*n*, los electrones se concentran inicialmente en el material tipo *n* y los orificios se concentran en el material tipo *p*.

La figura 19-17*b*) muestra un diagrama de un transistor *n*-*p*-*n* y su circuito eléctrico. La señal eléctrica a ser amplificada se conecta entre la base y el emisor, con un pequeño voltaje entre estas dos zonas. La salida del transistor, o sea la señal amplificada, se conecta entre el emisor y el colector, y opera a un voltaje más alto. El circuito se conecta de modo que se produzca una polarización

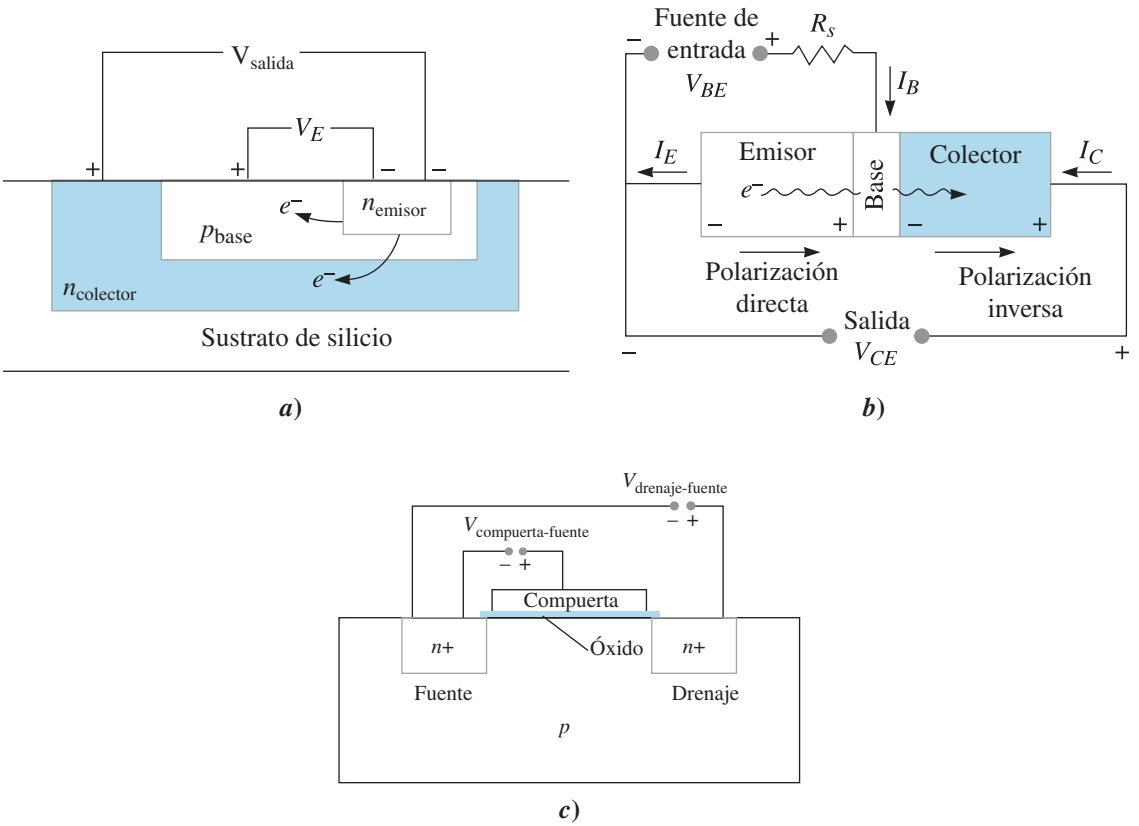


Figura 19-17 *a*) Esquema de la sección transversal del transistor. *b*) Un circuito para un transistor de unión bipolar *n*-*p*-*n*. La entrada crea una polarización directa e inversa que hace que los electrones se muevan desde el emisor, pasen por la base y entren en el colector, creando una salida amplificada. *c*) Esquema de la sección transversal de un transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico.

directa entre el emisor y la base (el voltaje positivo está en la base tipo *p*), mientras que se produce una polarización inversa entre la base y el colector (con el voltaje positivo en el colector tipo *n*). La polarización directa hace que los electrones salgan del emisor y entren en la base.

Los electrones y los orificios tratan de recombinarse en la base; no obstante, si la base es excepcionalmente delgada y está ligeramente contaminada, o si el tiempo de recombinación τ es largo, casi todos los electrones pasan por la base y entran al colector. La polarización inversa entre la base y el colector acelera los electrones que pasan por el colector, el circuito se completa y se produce una señal de salida. La corriente que pasa por el colector (I_c) está dada por

$$I_c = I_0 \exp\left(\frac{V_E}{B}\right) \tag{19-14}$$

donde I_0 y B son constantes y V_E es el voltaje entre el emisor y la base. Si se aumenta el voltaje de entrada V_E, se produce una corriente I_c muy grande.

Transistores de efecto de campo

Un segundo tipo de transistor, que en la actualidad se usa casi universalmente para almacenar y procesar datos, es el *transistor de efecto de campo* (TEC). Un transistor de efecto de campo (o MOSFET) de semiconductor de óxido metálico (MOS), está formado por dos regiones tipo *n* altamente contaminadas (*n*+) en un sustrato tipo *p*, o dos regiones tipo *p* altamente contaminadas en un sustrato tipo *n*. (Los procesos de manufactura por los cuales se forma un dispositivo como este se estudiarán en la sección 19-6). Considere un MOSFET formado por dos regiones tipo *n* altamente contaminadas en un sustrato tipo *p*. Una de las regiones tipo *n* se denomina fuente; la segunda se llama drenaje. Se aplica un potencial entre la

fuente y el drenaje con la región del drenaje positiva, pero en ausencia de un tercer componente del transistor (un conductor llamado compuerta) los electrones no pueden fluir desde la fuente al drenaje bajo la acción del campo eléctrico a través de la región tipo *p* de baja conductividad. La compuerta está separada del semiconductor por una delgada capa aislante de óxido y abarca la distancia entre las dos regiones tipo *n*. En estructuras avanzadas de dispositivos, el aislante tiene sólo algunas capas atómicas de grosor y comprende materiales que no son de sílice pura.

Se aplica un potencial entre la compuerta y la fuente, con la compuerta positiva. El potencial atrae electrones de la cercanía de la compuerta (y repele los orificios), pero los electrones no pueden entrar en la compuerta debido a la sílice. La concentración de electrones bajo la compuerta hace que esta región (conocida como canal) sea más conductora, de modo que un gran potencial entre la fuente y el drenaje permite que los electrones fluyan de la fuente al drenaje, produciendo una señal amplificada (estado "activo"). Al cambiar el voltaje de entrada entre la compuerta y la fuente, el número de electrones en la trayectoria conductora se transforma, cambiando también de este modo la señal de salida. Cuando no se aplica voltaje a la compuerta, no hay electrones atraídos a la región entre la fuente y el drenaje, y no hay flujo de corriente de la fuente al drenaje (estado "inactivo").

19-6 Perspectiva general del procesamiento de un circuito integrado

Los **circuitos integrados** (CI), también conocidos como microchips, constan de una gran cantidad de componentes electrónicos que se fabrican en la superficie de un material de sustrato en la forma de una oblea delgada, circular, de menos de 1 mm de grosor y hasta 300 mm de diámetro. Dos componentes particularmente importantes que se encuentran en los CI son los transistores, que pueden servir como interruptores eléctricos, como se vio en la sección 19-5, y los **condensadores**, que pueden almacenar datos en un formato digital. Cada oblea puede contener varios cientos de chips. El bien conocido microprocesador Xeon^{MR} de Intel es un ejemplo de un chip individual.

A principios de la década de 1960, cuando comenzó a desarrollarse, un circuito integrado comprendía sólo algunos componentes eléctricos, mientras que los CI modernos incluyen varios miles de millones de componentes en una superficie del tamaño de una estampilla de correos. Las dimensiones más pequeñas de los componentes de un CI (o "dispositivos") ahora se aproximan a la escala atómica. Este aumento en complejidad y sofisticación, acompañado de una reducción considerable del costo por componente, ha dado lugar a la era de las tecnologías de información en la que vivimos. Sin estos logros, los teléfonos celulares, internet, las computadoras de escritorio, los aparatos médicos de diagnóstico por imágenes y los sistemas portátiles de música, por mencionar sólo algunos iconos de la vida contemporánea, no podrían existir. Se calcula que en la actualidad el ser humano produce más transistores por año que granos de arroz.

Desde los comienzos de la fabricación del circuito integrado moderno, el objetivo de los investigadores y tecnólogos que trabajan en este campo ha sido una reducción del tamaño de los componentes individuales que constituyen a los circuitos integrados. Una expresión común de esta tendencia se conoce como la "ley de Moore", en honor a Gordon Moore, autor de un artículo científico fundamental publicado en 1965. En ese artículo, Moore, que sería cofundador de Intel Corporation, predijo que el rápido crecimiento del número de componentes fabricados en un chip representaba una tendencia que continuaría en el futuro. Tenía razón, y las tendencias generales que predijo todavía son evidentes cuatro décadas después.

Como resultado, por ejemplo, vemos que el número de transistores en un microprocesador ha crecido de unos miles a varios cientos de millones, mientras que los chips de memoria dinámica de acceso aleatorio (MDAA) han pasado de la marca de mil millones de transistores. Esto ha llevado a enormes avances en la capacidad de los sistemas electrónicos, en particular en función del costo por dólar. Durante este periodo, varias dimensiones de todos los componentes de un chip se han reducido, a menudo por órdenes de magnitud, y algunas dimensiones ahora se miden en nanómetros. Esta escala, como se le llama, impulsó y sigue impulsando la ley de Moore, e interviene en casi todos los aspectos del diseño y la fabricación de circuitos integrados. Mantener este avance ha requerido la asignación de cuantiosos recursos, tanto financieros como humanos, ya que las herramientas de pro-

cesamiento de los CI (y los medios físicos en los que residen) se han elaborado en serie para satisfacer los desafíos de una producción confiable de características incluso más pequeñas que las anteriores.

La fabricación de circuitos integrados comprende varios cientos de pasos de procesamiento individuales, y su realización puede requerir varias semanas. En muchos casos se repiten una y otra vez los mismos tipos de un paso de procesamiento, con algunas variaciones y quizá con otros pasos de procesamiento intermedios, para crear el circuito integrado. Estos conocidos "procesos unitarios" incluyen métodos para depositar capas finas de materiales sobre un sustrato, medios para definir y crear modelos intrincados dentro de una capa de material, y métodos para introducir cantidades precisas de contaminantes (dopantes) en capas o en la superficie de la oblea. Las escalas de longitud comprendidas en algunos de estos procesos se están aproximando a dimensiones atómicas.

El equipo que se usa para estos procesos unitarios incluye algunos de los aparatos más sofisticados y costosos que se hayan diseñado, muchos de los cuales deben mantenerse en "salas limpias", caracterizadas por niveles de polvo y contaminación de órdenes de magnitud más bajos que aquellos que se encuentran en una sala de operaciones quirúrgicas. La construcción de una instalación moderna para la fabricación de CI puede requerir de varios miles de millones de dólares de inversión de capital, así como de un millar o más personas para operarla.

Es frecuente que las obleas de silicio se crezcan usando la técnica de crecimiento de Czochralski [figura 19-18*a*)], en la cual se usa un pequeño cristal semilla para crecer los monocristales de silicio a un tamaño muy grande. El cristal semilla se hace girar con gran lentitud, se inserta un baño de silicio fundido y luego se saca del mismo. Los átomos de silicio se unen al cristal semilla en la orientación deseada a medida que el cristal se retrae. También se utilizan técnicas de Czochralski de zona de flotación y líquido encapsulado. Se prefieren los monocristales porque las propiedades eléctricas de los monocristales uniformemente dopados y sin dislocaciones están mejor definidas que las del silicio policristalino.

Después de la producción de las obleas de silicio, que por sí misma requiere un gasto y una experiencia considerables, hay cuatro clases principales de procedimientos de fabricación de un circuito integrado. La primera, conocida como procesamiento de "etapa inicial", comprende los pasos en los que los componentes eléctricos (por ejemplo, transistores) se crean en las regiones más superiores de la superficie de la oblea semiconductora. Es importante observar que casi todo el grosor de la oblea existe sólo como soporte mecánico; los componentes eléctricamente activos se forman en la superficie y por lo general se extienden sólo unas milésimas de milímetro en la oblea. El procesamiento de etapa inicial puede incluir cien o más pasos. En la figura 19-18*b* se muestra un diagrama de algunos pasos ejemplares en el procesamiento de etapa inicial para producir un transistor de efecto de campo.

El procesamiento de "etapa final" provoca la formación de una red de "interconexiones" en la superficie de la oblea y apenas encima de ésta. Las interconexiones se forman en películas delgadas de material depositado sobre la oblea que siguen patrones de redes precisas; éstas sirven como rutas conductoras tridimensionales que permiten que las señales eléctricas pasen entre los componentes electrónicos individuales, como se requiere para que opere el CI y ejecute operaciones matemáticas y lógicas, o para que almacene y recupere datos. El procesamiento de etapa final culmina con capas protectoras de material aplicado a las obleas que impiden daños mecánicos y ambientales. Una característica de la fabricación de los CI es que a menudo se fabrica una gran cantidad de obleas al mismo tiempo, con varios cientos o varios miles de CI, que a su vez pueden tener cada uno varios millones o miles de millones de componentes individuales.

Una vez concluido el procesamiento de etapa final, las obleas se someten a diversos procedimientos de prueba para evaluar tanto la oblea en su conjunto como los chips individuales. Como el número de componentes por chip ha aumentado y el tamaño de los componentes se ha reducido, los procedimientos de prueba son cada vez más complejos y especializados. Las obleas con una fracción demasiado pequeña de chips que funcionan se desechan.

Los últimos pasos en la producción de CI funcionales se conocen de manera colectiva como "encapsulado", durante el cual las obleas se cortan para producir chips individuales que son físicamente distintos. Para proteger los chips contra daños, corrosión y deterioros semejantes, así como para permitir que las señales eléctricas entren y salgan de los chips, se les coloca en recipientes especiales sellados herméticamente que a veces son sólo apenas más grandes que el mismo chip. Una computadora equipada con un solo microprocesador contiene múltiples chips para desempeñar muchas otras funciones.

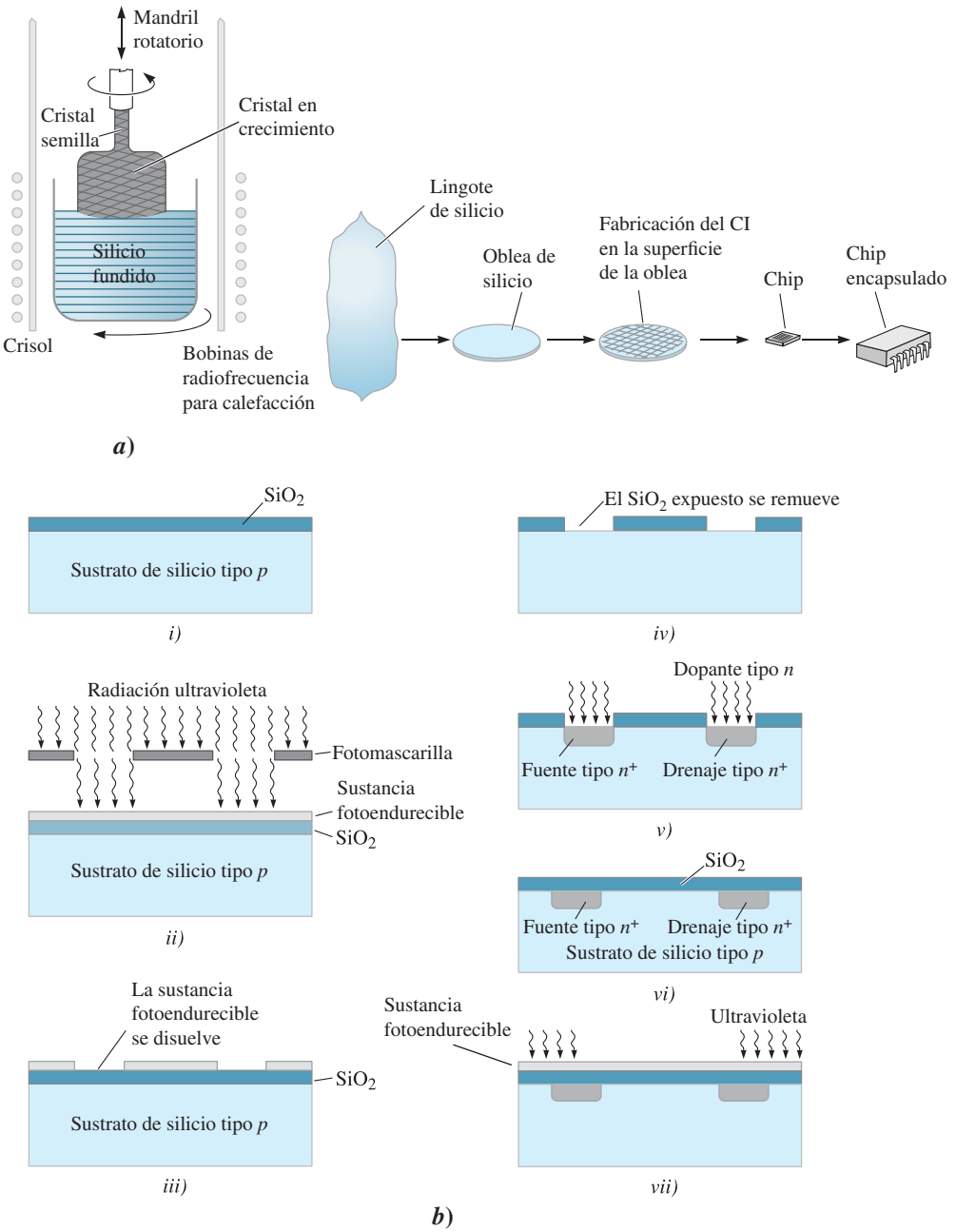


Figura 19-18 *a*) Técnica de crecimiento de Czochralski para el crecimiento de monocristales de silicio. (*Basado en* Microchip Fabrication, *3a. ed., por P. VanZant, McGraw-Hill, 1997.*) *b*) Pasos generales encontrados en el procesamiento de semiconductores. Producción de un dispositivo semiconductor FET: *i*) Se oxida un sustrato de silicio tipo *p*. *ii*) En un proceso conocido como fotolitografía, la radiación ultravioleta pasa por una fotomascarilla (que es muy semejante a un esténcil), con lo cual se expone un material fotosensible conocido como sustancia fotoendurecible previamente sedimentado en la superficie. *iii*) La sustancia fotoendurecible expuesta se disuelve. *iv*) La sílice expuesta se remueve por ataque químico. *v*) Se introduce un dopante tipo *n* para producir la fuente y el drenaje. *vi*) El silicio se oxida de nuevo. *vii*) Se repite la fotolitografía para introducir otros componentes al dispositivo, incluyendo las conexiones eléctricas. (*Basado en* Fundamentals of Modern Manufacturing, *por M.P. Groover, John Wiley & Sons, Inc., 1996.*)

19-7 Deposición de películas delgadas

Como se vio en la sección 19-6, la fabricación de circuitos integrados depende en parte de la deposición de **películas delgadas** de materiales sobre un sustrato. Esto es igualmente cierto para numerosas tecnologías que emplean películas, recubrimientos y otras capas delgadas de materiales; por ejemplo, capas resistentes al desgaste en herramientas de corte, recubrimientos antirreflejantes en componentes ópticos, así como capas magnéticas depositadas sobre discos de aluminio para almacenar datos. Las películas delgadas pueden presentar microestructuras y propiedades físicas muy diferentes a las de sus equivalentes voluminosos, características que pueden explotarse de varias maneras. La creación, estudio y uso de películas delgadas representa un campo de actividad extraordinariamente amplio de la ciencia e ingeniería de materiales, que tiene un impacto enorme en la tecnología moderna.

Como su nombre lo indica, las películas delgadas son muy pequeñas en una dimensión, en especial en comparación con la magnitud de las otras dos dimensiones. No hay un límite superior bien definido en el significado de "delgadas", pero numerosas tecnologías modernas utilizan en forma rutinaria grosores que varían de varios micrones hasta algunas dimensiones atómicas. Existen miles de formas en las que se pueden depositar las películas delgadas, pero en general cualquier técnica abarca una *fuente* del material a depositarse y un medio para *transportar* el material de la fuente a la superficie de la pieza de trabajo en la que se ha de depositar. Muchas técnicas de deposición requieren que la fuente y la pieza de trabajo se mantengan en un sistema de vacío, en tanto que otras colocan la pieza de trabajo en un ambiente líquido.

La **deposición física de vapor** (**DFV**) es una categoría muy importante de las técnicas de crecimiento de películas delgadas. La DFV tiene lugar en una cámara de vacío y por un medio u otro se crea un vapor de baja presión del material a depositar. Parte de este vapor se condensa en la pieza de trabajo y, por lo tanto, comienza a depositarse como una película delgada. Simplemente fundir un material en un vacío, dependiendo de su presión de vapor, a veces puede producir un depósito útil de material.

La **deposición electrónica** es un ejemplo de deposición física de vapor y es el método más importante de la DFV para la fabricación de circuitos integrados. Las interconexiones que llevan señales eléctricas de un dispositivo electrónico a otro en un chip de CI por lo general se han hecho de aleaciones de aluminio sedimentadas por deposición electrónica. Este método se puede emplear para depositar materiales conductores y aislantes.

Como se ilustra en la figura 19-19, en una cámara de deposición electrónica primero se ionizan el argón u otros átomos en un gas y luego se aceleran por un campo eléctrico hacia una fuente de material a depositarse, a veces llamado "objeto fuente". Estos iones desprenden y expulsan átomos de la superficie del material de la fuente, algunos de los cuales cruzan un vacío hacia la pieza de trabajo; los que se condensan en su superficie, se dice que están depositados. Dependiendo de cuánto tiempo continúe el proceso, es posible depositar electrónicamente las películas que miden muchos micrones de grosor.

La **deposición química de vapor** (**DQV**) representa otro conjunto de técnicas de uso muy extendido en la industria de los CI. En la DQV, la fuente del material a ser depositado existe en forma gaseosa. El gas fuente y otros gases se introducen en una cámara caliente al vacío, donde experimentan una reacción química que crea el material deseado como producto. Este producto se condensa en la pieza de trabajo (como en el proceso de DFV) creando así, con el tiempo, una capa del material. En algunos procesos DQV, la reacción química puede tener lugar de preferencia en ciertas zonas de la pieza de trabajo misma. Las películas delgadas de silicio policristalino, tungsteno y nitruro de titanio se depositan a menudo por DQV como parte de la manufactura del CI. El crecimiento de un nanoalambre, que se estudia en el capítulo 11, a veces también continúa por medio de un proceso de SQV.

La **electrodeposición** es un tercer método de recubrimiento de una pieza de trabajo con una película delgada de un metal. Aun cuando esta es una tecnología muy antigua, en tiempos recientes su uso se ha adoptado en la manufactura de los CI, en especial para depositar películas de cobre, las cuales están sustituyendo a las películas de aluminio en los circuitos integrados más avanzados. En la electrodeposición, la fuente y la pieza de trabajo se sumergen en un electrolito líquido y se conectan por medio de un circuito eléctrico externo. Cuando se aplica un voltaje entre la fuente y la pieza, los iones del material de la fuente se disuelven en el electrolito, se mueven bajo la influencia del campo hacia la pieza de trabajo y se enlazan químicamente sobre su superficie. Con el tiempo, se deposita una película delgada de esta manera. En algunas circunstancias quizá no sea necesario un campo

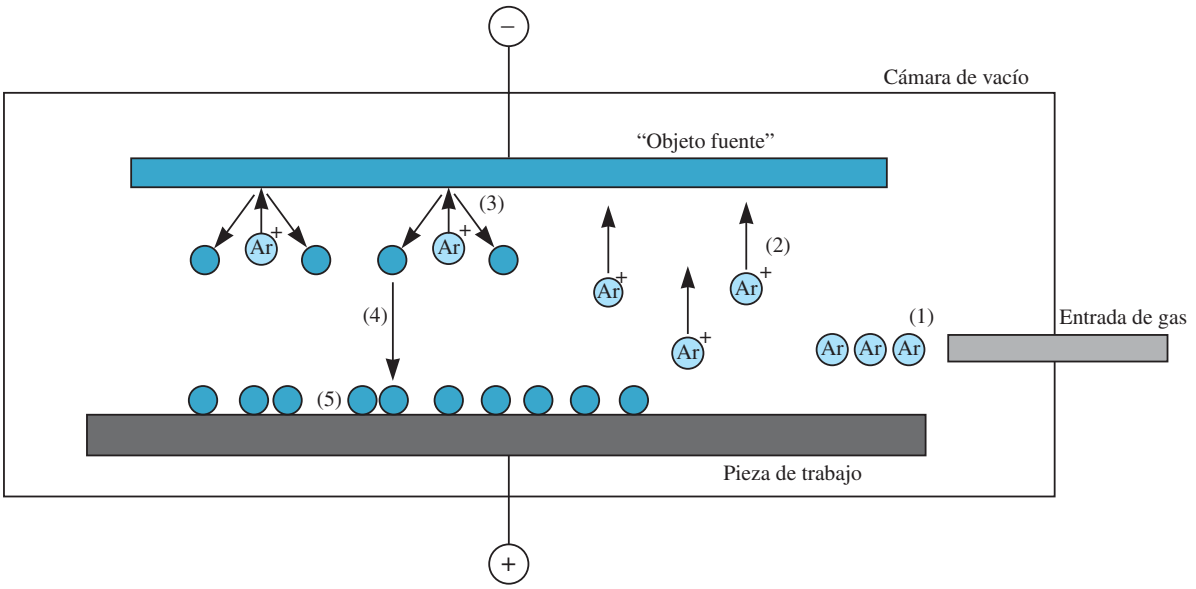


Figura 19-19 Ilustración de una deposición electrónica. La pieza de trabajo y el objeto fuente de la deposición electrónica se colocan en una cámara de vacío. 1) Una entrada permite que un gas como el argón penetre a baja presión. En presencia del campo eléctrico entre el objeto fuente y la pieza de trabajo, algunos de los átomos de argón se ionizan 2) y luego se aceleran hacia el objeto fuente. Por transferencia de cantidad de movimiento, los átomos del objeto fuente son expulsados 3), se mueven por la brecha hacia la pieza 4) y se condensan en la misma 5), depositándose así los átomos del objeto fuente y formando finalmente una película. (*Cortesía de John Bravman*).

eléctrico externo, a lo cual se llama deposición sin electrodos. La electrodeposición y la deposición sin electrodos a veces se conocen como galvanoplastia o "platinado o galvanizado", y la película sedimentada se dice que está "plateada" en la pieza de trabajo.

19-8 Conductividad en otros materiales

La conductividad eléctrica en casi todos los materiales cerámicos y polímeros es baja; no obstante, algunos materiales especiales proporcionan una conducción limitada e incluso buena. En el capítulo 4 se analizó la forma en que se puede usar la notación Kröger-Vink para explicar la química de los defectos en materiales cerámicos. Con el uso de dopantes es posible convertir en óxidos conductores a muchos materiales cerámicos (por ejemplo, $BaTiO_3$, TiO_2, ZrO_2) que normalmente son aislantes. La conducción en estos materiales puede ocurrir como resultado del movimiento de iones o electrones y orificios.

Conducción en materiales iónicos

En ocasiones la conducción en materiales iónicos ocurre por movimiento de iones completos porque la brecha de energía es demasiado grande para que entren electrones a la banda de conducción. Por ello, casi todos los materiales iónicos se comportan como aislantes.

En materiales iónicos, la movilidad de los portadores de carga, o iones, es

$$\mu = \frac{ZqD}{k_B T} \tag{19-15}$$

donde D es el coeficiente de difusión, k_B la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta, q la carga electrónica y Z la carga en el ion. La movilidad es muchos órdenes de magnitud menor que la movilidad de los electrones, de modo que la conductividad es muy pequeña:

$$\sigma = nZq\mu \tag{19-16}$$

Para materiales iónicos, n es la concentración de iones que contribuyen a la conducción. Las impurezas y vacancias incrementan la conductividad. Las vacancias son necesarias para la difusión en

tipos sustitucionales de estructuras cristalinas, y las impurezas pueden difundirse y ayudar a llevar la corriente. Las temperaturas altas incrementan la conductividad porque se incrementa la rapidez de difusión. El siguiente ejemplo ilustra la estimación de la movilidad y la conductividad en el MgO.

Ejemplo 19-6 *Conducción iónica en el MgO*

Suponga que la conductividad eléctrica del MgO es determinada principalmente por la difusión de los iones Mg^{2+}. Estime la movilidad de los iones Mg^{2+} y calcule la conductividad eléctrica del MgO a 1800°C. El coeficiente de difusión de los iones Mg^{2+} en MgO a 1800°C es 10^{-10} cm^2/s.

SOLUCIÓN

Para el MgO, $Z = 2$/ion, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, y $T = 2073$ K:

$$\mu = \frac{ZqD}{k_BT} = \frac{(2)(1.6 \times 10^{-19}\,C)(10^{-10}\,cm^2/s)}{(1.38 \times 10^{-23}\,J/K)(2073\,K)} = 1.12 \times 10^{-9}\,C \cdot cm^2/(J \cdot s)$$

Como un coulomb es equivalente a un ampere · segundo y un joule es equivalente a un ampere · segundo · volt:

$$\mu = 1.12 \times 10^{-9}\,cm^2/(V \cdot s)$$

El MgO tiene la estructura del NaCl con cuatro iones de magnesio por celda unitaria. El parámetro de red es 3.96×10^{-8} cm, de modo que el número de iones de Mg^{2+} por centímetro cúbico es

$$n = \frac{(4\,Mg^{2+}\,iones/celdas)}{(3.96 \times 10^{-8}\,cm)^3/celdas} = 6.4 \times 10^{22}\,iones/cm^3$$

$$\sigma = nZq\mu = (6.4 \times 10^{22})(2)(1.6 \times 10^{-9})(1.12 \times 10^{-9})$$

$$= 23 \times 10^{-6}\,C \cdot cm^2/(cm^3 \cdot V \cdot s)$$

Como un coulomb es equivalente a un ampere · segundo (A · s) y un volt es equivalente a un ampere · ohm (A · Ω),

$$\sigma = 2.3 \times 10^{-5}\,ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$$

Aplicaciones de óxidos iónicamente conductores

El óxido transparente y conductor de uso más común es el óxido de estaño e indio (ITO), que se usa como recubrimiento conductor transparente en vidrio en placa. Otras aplicaciones del ITO incluyen pantallas táctiles para computadoras y dispositivos como los cajeros automáticos. Otro óxido conductor es el zirconio estabilizado con itria (YSZ), que se usa como electrolito sólido en celdas de combustible de óxido sólido. El óxido de cobalto de litio se usa como electrolito sólido en baterías de iones de litio. Es importante recordar que no obstante que casi todos los materiales cerámicos se comportan como aislantes eléctricos, es posible convertir a muchos de ellos en semiconductores por medio de un diseño apropiado de los defectos puntuales en materiales cerámicos.

Conducción en polímeros

Debido a que sus electrones de valencia intervienen en enlaces covalentes, los polímeros tienen una estructura de banda con una brecha grande de energía, lo cual lleva a una baja conductividad eléctrica. Los polímeros se usan con frecuencia en aplicaciones que requieren aislamiento eléctrico para evitar cortocircuitos, arqueo y riesgos de seguridad. La tabla 19-1 incluye la conductividad de cuatro polímeros comunes. No obstante, en algunos casos la baja conductividad es un obstáculo. Por ejemplo, si un rayo incide sobre el ala del compuesto de matriz polimérica de un avión, puede provocar daños graves. Estos problemas se pueden resolver mediante dos procedimientos: 1) la introducción de un aditivo al polímero para mejorar la conductividad, y 2) la creación de polímeros que inherentemente tienen buena conductividad.

La introducción de aditivos eléctricamente conductores puede mejorar la conductividad. Por ejemplo, los materiales compuestos de matriz polimérica que contienen fibras de carbono o de carbono chapado con níquel combinan alta rigidez con mejor conductividad; los compuestos híbri-

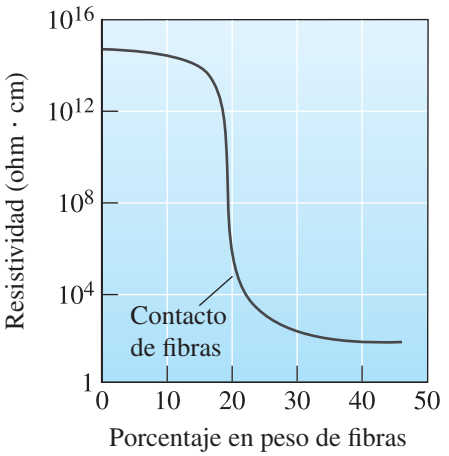


Figura 19-20 Efecto de las fibras de carbono en la resistividad eléctrica del nylon.

dos que contienen fibras de metal, junto con carbono normal, vidrio o fibras de aramida, también producen revestimientos contra rayos en aviones. La figura 19-20 muestra que cuando se introducen suficientes fibras de carbono en nylon para asegurar que haya contacto entre las fibras la resistividad se reduce casi en 13 órdenes de magnitud. También se usan rellenos y fibras conductoras para producir polímeros que protegen contra la radiación electromagnética.

Algunos polímeros inherentemente tienen buena conductividad como resultado de las técnicas de dopado o de procesamiento. Cuando los polímeros acetales son dopados con agentes como el pentafluoruro de arsénico, los electrones u orificios pueden saltar libremente de un átomo a otro a lo largo de la estructura de la cadena, incrementando la conductividad casi a la de los metales. Algunos polímeros, por ejemplo el poliftalocianino, pueden eslabonarse en cruz por medio de procesos especiales de curado para incrementar la conductividad hasta a 10^2 ohm^{-1} · cm^{-1}, proceso que permite que el polímero se comporte como un semiconductor. Debido al enlace cruzado, los electrones pueden moverse con más facilidad de una cadena a otra. Los diodos emisores de luz orgánicos se fabrican de polímeros semiconductores que incluyen las polianilinas.

19-9 Aislantes y sus propiedades dieléctricas

Los materiales que se usan para aislar un campo eléctrico de su entorno se requieren en un gran número de aplicaciones eléctricas y electrónicas. Obviamente, los aislantes eléctricos deben tener una conductividad muy baja, o bien resistividad alta, para evitar el flujo de corriente. Los aislantes también deben ser capaces de resistir campos eléctricos intensos. Los aislantes se producen de materiales cerámicos y poliméricos en los que hay una gran brecha de energía entre las bandas de valencia y de conducción; no obstante, la alta resistividad eléctrica de estos materiales no siempre es suficiente. A altos voltajes, puede ocurrir una ruptura catastrófica del aislante y provocar que la corriente fluya. Por ejemplo, los electrones pueden tener energías cinéticas suficientes para ionizar los átomos del aislante, creando así electrones libres y generando una corriente a altos voltajes. Para seleccionar adecuadamente un material aislante se debe comprender la forma en que el material almacena y conduce carga eléctrica. La porcelana, la alúmina, la cordierita, la mica y algunos vidrios y plásticos se usan como aislantes. La resistividad de la mayor parte de éstos es $> 10^{14}\ \Omega \cdot$ cm, y los campos eléctricos de ruptura son de ~5 a 15 kV/mm.

19-10 Polarización en dieléctricos

Cuando se aplica un esfuerzo a un material se desarrolla un cierto nivel de deformación. Del mismo modo, cuando se someten materiales a un campo eléctrico los átomos, moléculas o iones responden al campo eléctrico (E) aplicado. Así, se dice que el material está polarizado. Un dipolo es un par de cargas opuestas separadas por cierta distancia. Si una carga $+q$ se separa de otra carga $-q$ (q es la carga electrónica) y d es la distancia entre estas cargas, el momento del dipolo es $q \times d$. La magnitud de polarización está dada por $P = zqd$, donde z es el número de centros de carga que son desplazados por metro cúbico.

Cualquier separación de cargas (por ejemplo, entre el núcleo y la nube de electrones), o cualquier mecanismo que lleve a un cambio en la separación de cargas que ya están presentes (por ejemplo, movimiento o vibraciones de iones en un material iónico), provoca **polarización**. Existen cuatro mecanismos principales que provocan polarización: 1) polarización electrónica, 2) polarización iónica, 3) polarización molecular y 4) carga espacial (figura 19-21). Se presenta dependiendo de la frecuencia eléctrica del campo aplicado, igual que el comportamiento mecánico de los materiales depende de la rapidez de deformación (capítulos 6 y 8). Si se aplica una deformación muy rápida, ciertos mecanismos de deformación plástica no se activan. Del mismo modo, si se aplica un campo eléctrico que se alterna rápidamente, tal vez algunos mecanismos de polarización no puedan inducir polarización en el material.

Los mecanismos de polarización desempeñan dos papeles importantes. Primero, si se fabrica un **condensador** de un material, los mecanismos de polarización permiten almacenar carga, porque los dipolos creados en el material (como resultado de la polarización) pueden fijar cierta parte de la carga de los electrodos del condensador. En esa forma, cuanto más alta sea la polarización dieléctrica, mayor será la constante dieléctrica (k) del material. La constante dieléctrica se define como la relación de capacitancia entre un condensador lleno de material dieléctrico y uno con vacío entre sus electrodos. Este almacenamiento de carga, en algunas formas, es semejante a la deformación elástica

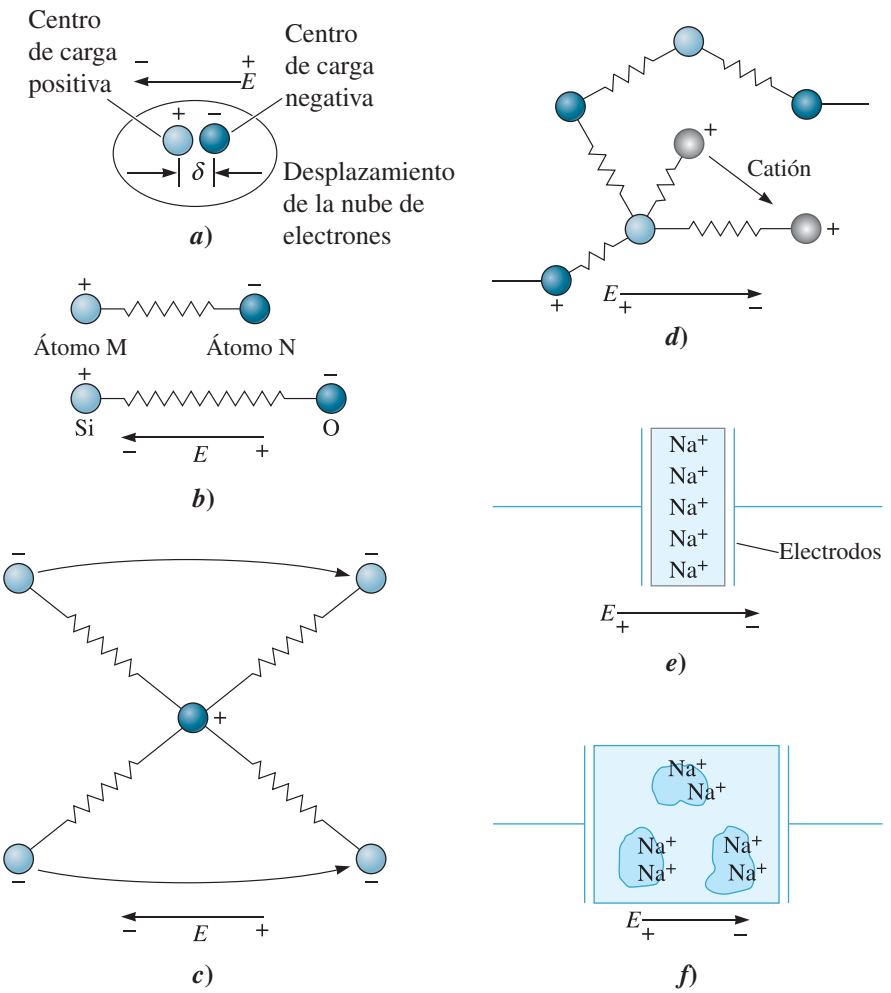


Figura 19-21 Mecanismos de polarización en materiales: *a*) electrónica, *b*) atómica o iónica, *c*) dipolar de alta frecuencia o de orientación (presente en materiales ferroeléctricos), *d*) dipolar de baja frecuencia (presente en dieléctricos lineales y vidrios), *e*) carga espacial interfacial en electrodos, y *f*) carga espacial interfacial en heterogeneidades, como en límites de grano. (*Basado en* Principles of Electronic Ceramics, *L.L. Hench, J.K. West*, *Wiley Interscience, John Wiley & Sons, Inc., 1990.*)

en un material sujeto a un esfuerzo. El segundo papel importante que desempeñan los mecanismos de polarización es que, cuando se establece la polarización, se mueven cargas (los iones o nubes de electrones se desplazan). Si el campo eléctrico oscila, las cargas se mueven hacia adelante y hacia atrás. Estos desplazamientos son extraordinariamente pequeños (por lo general < 1 Å); no obstante, provocan **pérdidas dieléctricas**. Esta energía se pierde como calor. La pérdida dieléctrica es semejante a la deformación viscosa de un material. Si se desea almacenar una carga, como en un condensador, la pérdida dieléctrica no es buena; pero si se desea usar microondas para calentar un alimento, las pérdidas dieléctricas que ocurren en el agua contenida en el alimento son grandes. Es frecuente que las pérdidas dieléctricas se midan empleando un parámetro conocido como *tan* δ. Cuando nos interesan materiales con pérdida extraordinariamente baja, como los que se usan en comunicaciones por microondas, nos referimos a un parámetro conocido como *factor de calidad* ($Q_d \sim 1/\tan \delta$) del dieléctrico. La constante dieléctrica y las pérdidas dieléctricas dependen en gran medida de la frecuencia eléctrica y de la temperatura.

La polarización electrónica es omnipresente, dado que todos los materiales contienen átomos. La nube de electrones es desplazada del núcleo en respuesta al campo visto por los átomos. La separación de cargas crea un momento dipolar [figura 19-21*a*)]. Este mecanismo puede resistir las más altas frecuencias eléctricas ($\sim 10^{15}$ Hz) debido a que una nube de electrones puede desplazarse con rapidez hacia delante y hacia atrás, a medida que cambia el campo eléctrico. Los átomos y los iones más grandes tienen una mayor polarización electrónica (tendencia a sufrir polarización), ya que la nube de electrones está más alejada del núcleo y se mantiene con menos fuerza. Este mecanismo de polarización también está unido estrechamente al índice de refracción de los materiales, dado que la luz es una onda electromagnética para la cual el campo eléctrico oscila a frecuencias muy altas ($\sim 10^{14} - 10^{16}$ Hz). Cuanto más alta sea la polarización electrónica, mayor será el índice de refracción. Este mecanismo se usa en la fabricación de "cristal de plomo", que en realidad es un vidrio amorfo que contiene hasta 30% de PbO. Los iones grandes de plomo (Pb^{+2}) son muy polarizables, debido a los mecanismos de polarización electrónica y proporcionan un índice de alta refracción cuando hay concentraciones suficientemente altas de óxido de plomo en el vidrio. Este índice de alta refracción hace que se refleje más luz que por un cristal con un índice de refracción menor, mejorando así su apariencia con fines estéticos.

Ejemplo 19-7 *Polarización electrónica en cobre*

Suponga que el desplazamiento medio de los electrones con respecto al núcleo en un átomo de cobre es 10^{-8} Å cuando se aplica un campo eléctrico en una placa de cobre. Calcule la polarización electrónica.

SOLUCIÓN

El número atómico del cobre es 29, de modo que hay 29 electrones en cada átomo de cobre. El parámetro de red del cobre es 3.6151 Å. Entonces,

$$z = \frac{(4\,\text{átomos/celda})(29\ \text{electrones/átomo})}{(3.6151 \times 10^{-10}\,\text{m})^3/\text{celda}} = 2.455 \times 10^{30}\,\text{electrones/m}^3$$

$$P = zqd = \left(2.455 \times 10^{30}\,\frac{\text{electrones}}{\text{m}^3}\right)\left(1.6 \times 10^{-19}\,\frac{\text{C}}{\text{electrón}}\right)(10^{-8}\text{Å})(10^{-10}\,\text{m/Å})$$

$$= 3.93 \times 10^{-7}\,\text{C/m}^2$$

Dependencia en la frecuencia y la temperatura de la constante dieléctrica y las pérdidas dieléctricas

Un condensador es un dispositivo capaz de almacenar una carga eléctrica. Por lo general está formado por dos electrodos con un material dieléctrico colocado entre ellos. El dieléctrico puede o no ser sólido; incluso un vacío de aire puede servir como dieléctrico. Dos electrodos paralelos de placas planas representan la configuración más sencilla de un condensador.

La capacitancia C es la capacidad de almacenar carga y se define como

$$C = \frac{Q}{V} \tag{19-17}$$

donde Q es la carga en las placas de los electrodos de un condensador y V el voltaje aplicado [figura 19-22*a*)]. Observe que debe aplicarse un voltaje para crear la carga en los electrodos, pero que la carga está "almacenada" en ausencia del voltaje hasta que un circuito externo permita disiparla. En dispositivos microelectrónicos, ésta es la base para almacenar datos digitales. Si el espacio entre dos placas paralelas (con área superficial A y separadas por una distancia t) se llena con un material, entonces la constante dieléctrica k, también conocida como permisividad relativa ε_r, se determina con base en

$$C = \frac{\mathrm{k}\,\varepsilon_0 A}{t} \tag{19-18}$$

La constante ε_0 es la **permisividad** de un vacío y es 8.85×10^{-12} F/m. Cuando el material experimenta polarización, puede fijar cierta cantidad de carga en los electrodos, como se ilustra en la figura 19-22*b*). Cuanto mayor sea la polarización, mayor será la constante dieléctrica y, por lo tanto, mayor será la carga fija en los electrodos.

La constante dieléctrica es la medida de qué tan susceptible es el material al campo eléctrico aplicado. La constante dieléctrica depende de la composición, la microestructura, la frecuencia eléctrica y la temperatura. La capacitancia depende de la constante dieléctrica, del área de los electrodos y de la separación entre los electrodos. Los condensadores en paralelo proporcionan capacitancia sumada (igual que las resistencias se suman en serie). Esta es la razón por la cual los condensadores de capas múltiples están formados por 100 o más capas conectadas en paralelo. Por lo general, éstas se basan en fórmulas de $BaTiO_3$ y se preparan usando un proceso de vaciado en cinta. Se usan paladio de plata o níquel como capas de electrodos.

Para un aislamiento eléctrico, la **resistencia dieléctrica** (es decir, el valor del campo eléctrico que puede soportarse antes de la ruptura eléctrica) es importante. Las propiedades dieléctricas de algunos materiales se muestran en la tabla 19-7.

Dieléctricos lineales y no lineales

La constante dieléctrica, como es de esperarse, está relacionada con la polarización que puede obtenerse en el material. Es posible demostrar que la polarización dieléctrica inducida en un material depende del campo eléctrico aplicado y de la constante dieléctrica, con base en

$$P = (\mathrm{k} - 1)\varepsilon_0 E \,(\text{para dieléctricos lineales}) \tag{19-19}$$

donde E es la resistencia del campo eléctrico (V/m). Para materiales que se polarizan con facilidad, la constante dieléctrica y la capacitancia son grandes y, a su vez, se puede almacenar una gran cantidad de carga. Además, la ecuación 19-19 sugiere que la polarización aumenta, al menos hasta que

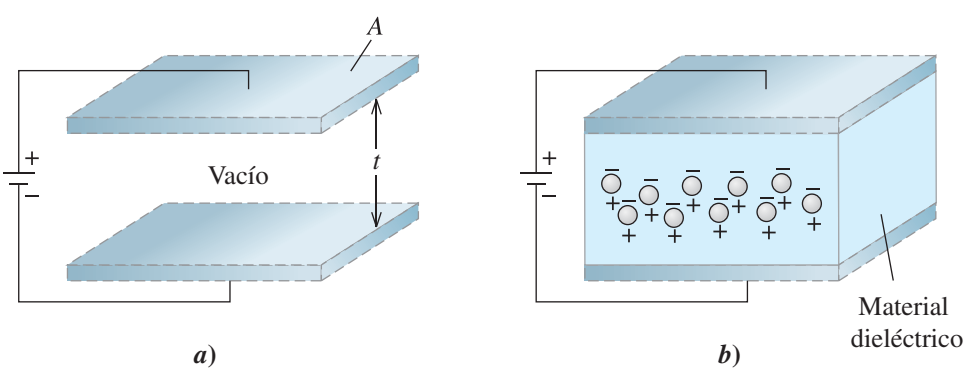


Figura 19-22 *a*) Puede almacenarse una carga en las placas conductoras en un vacío. *b*) Cuando un dieléctrico se coloca entre las placas, el dieléctrico se polariza y se almacena una carga adicional.

Tabla 19-7 Propiedades de algunos materiales dieléctricos

Material	Constante dieléctrica (a 60 Hz)	Constante dieléctrica (a 10^6 Hz)	Resistencia dieléctrica (10^6 V/m)	tan δ (a 10^6 Hz)	Resisitivdad (Ohm · cm)
Polietileno	2.3	2.3	20	0.00010	$> 10^{16}$
Teflón	2.1	2.1	20	0.00007	10^{18}
Poliestireno	2.5	2.5	20	0.00020	10^{18}
PVC	3.5	3.2	40	0.05000	10^{12}
Nylon	4.0	3.6	20	0.04000	10^{15}
Caucho	4.0	3.2	24		
Fenólico	7.0	4.9	12	0.05000	10^{12}
Epoxi	4.0	3.6	18		10^{15}
Cera de parafina		2.3	10		10^{13}–10^{19}
Sílice fundida	3.8	3.8	10	0.00004	10^{11}–10^{12}
Vidrio de sosa-cal	7.0	7.0	10	0.00900	10^{15}
Al_2O_3	9.0	6.5	6	0.00100	10^{11}–10^{13}
TiO_2		14–110	8	0.00020	10^{13}–10^{18}
Mica		7.0	40		10^{13}
$BaTiO_3$		2000–5000	12	~0.0001	10^{8}–10^{15}
Agua		78.3			10^{14}

todos los dipolos estén alineados, cuando se incrementa el voltaje (expresado por la resistencia del campo eléctrico). La cantidad (k−1) se conoce como susceptibilidad dieléctrica (χ_e). La constante dieléctrica del vacío es uno, o la susceptibilidad dieléctrica es cero. Esto tiene sentido porque un vacío no contiene átomos ni moléculas.

En **dieléctricos lineales**, P está linealmente relacionada con E y k es constante. Esto es semejante a la forma en que un esfuerzo y una deformación se relacionan linealmente mediante la ley de Hooke. En dieléctricos lineales, k (o χ_e) permanece constante cuando cambia E. En materiales como el $BaTiO_3$, la constante dieléctrica cambia con E, y en consecuencia no se puede usar la ecuación 19-19. Los materiales en los que P y E no se relacionan por medio de una recta se conocen como **dieléctricos no lineales** o ferroeléctricos. Estos materiales son semejantes a los elastómeros para los cuales un esfuerzo y una deformación no se relacionan linealmente y no se puede asignar un valor único al módulo de Young.

19-11 Electroestricción, piezoelectricidad y ferroelectricidad

Cuando un material cualquiera experimenta polarización, sus iones y nubes de electrones se desplazan, provocando el desarrollo de una deformación mecánica en el material. Este efecto se ve en todos los materiales sujetos a un campo eléctrico y se conoce como **electroestricción**.

Del total de 32 clases de cristales, 11 tienen un centro de simetría. Esto significa que si se aplica un esfuerzo mecánico, no se genera momento dipolar porque los movimientos iónicos son simétricos. De los 21 que restan, 20 grupos puntuales, que carecen de centro de simetría, exhiben el desarrollo de polarización dieléctrica cuando se someten a un esfuerzo. Estos materiales se conocen como **piezoeléctricos**. (La palabra *piezo* significa presión.) Cuando estos materiales se someten a un esfuerzo, desarrollan un voltaje. Este desarrollo del voltaje ante la aplicación de un esfuerzo se conoce como *efecto piezoeléctrico motor* o *directo* (figura 19-23). Este efecto ayuda a hacer dispositivos como encendedores de chispa, que a veces se fabrican usando titanato de zirconio en plomo (PZT). Dicho efecto también se usa, por ejemplo, para detectar submarinos y otros objetos bajo la superficie del agua.

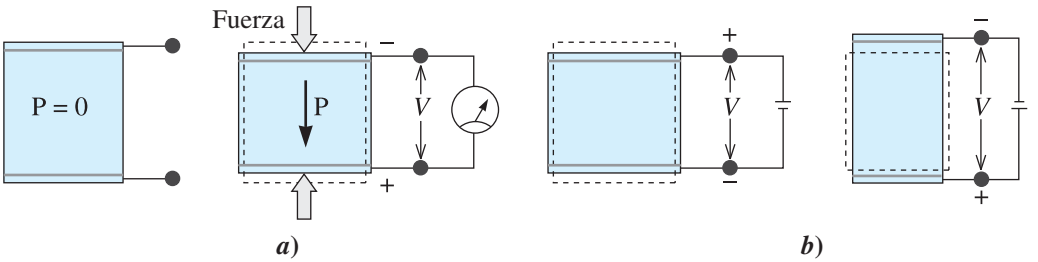


Figura 19-23 Efecto piezoeléctrico *a*) directo y *b*) inverso. En el efecto piezoeléctrico directo, el esfuerzo aplicado hace que aparezca un voltaje. En el efecto inverso *b*), un voltaje aplicado lleva al desarrollo de una deformación.

Por el contrario, cuando se aplica un voltaje eléctrico, un material piezoeléctrico muestra el desarrollo de una deformación. Esto se conoce como *efecto piezoeléctrico generador* o *inverso*. Este efecto se usa para la fabricación de activadores. Por ejemplo, este movimiento puede usarse para generar ondas de ultrasonido que se emplean al tomar imágenes médicas, así como en aplicaciones como limpiadores ultrasónicos o cepillos dentales. También se puede crear energía sónica usando piezoeléctricos para fabricar el altavoz de "agudos" de alta fidelidad que se encuentra en casi todos los sistemas de sonido. Además del $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (PZT), otros piezoeléctricos incluyen SiO_2 (para fabricar osciladores de cristal de cuarzo), ZnO y fluoruro de polivinilideno (PVDF). Numerosos materiales presentes en la naturaleza, como el hueso y la seda, también son piezoeléctricos.

La constante "*d*" para un piezoeléctrico se define como la razón entre la deformación (ε) y el campo eléctrico:

$$\varepsilon = d \cdot E \tag{19-20}$$

La constante "*g*" para un piezoeléctrico se define como la razón entre el campo eléctrico generado y el esfuerzo aplicado (X):

$$E = g \cdot X \tag{19-21}$$

Los coeficientes piezoeléctricos d y g están relacionados por la constante dieléctrica como sigue:

$$g = \frac{d}{k\varepsilon_0} \tag{19-22}$$

Se define como **ferroeléctricos** a los materiales que muestran el desarrollo de una polarización dieléctrica (P_s) espontánea y reversible. Un ejemplo es el polimorfo tetragonal de titanato de bario. El titanato de zirconio de plomo es ferroeléctrico y piezoeléctrico. Los materiales ferroeléctricos muestran un **ciclo de histéresis** (es decir, la polarización inducida no está linealmente relacionada con el campo eléctrico aplicado), como se aprecia en la figura 19-24. Los materiales ferroeléctricos exhiben dominios ferroeléctricos en los que la región (o dominio) tiene una polarización uniforme (figura 19-25). Ciertos ferroeléctricos, como el PZT, exhiben un fuerte efecto piezoeléctrico, pero para maximizarlo en los materiales piezoeléctricos (por ejemplo, en el desarrollo de una deformación o un voltaje) se inducen polos de forma deliberada usando un campo eléctrico para alinear todos los dominios en una dirección. El campo eléctrico se aplica a alta temperatura y se mantiene mientras el material se enfría.

La constante dieléctrica de los materiales ferroeléctricos alcanza un máximo cerca de una temperatura conocida como **temperatura de Curie**. A esta temperatura, la estructura cristalina adquiere un centro de simetría y, por lo tanto, ya no es piezoeléctrica. Sin embargo, la constante dieléctrica de los materiales ferroeléctricos permanece alta incluso a estas altas temperaturas. El $BaTiO_3$ exhibe este comportamiento. Esta es la razón por la que el $BaTiO_3$ se usa para fabricar condensadores de una capa o de múltiples capas. En este estado, las vibraciones y los golpes no generan voltajes espurios debido al efecto piezoeléctrico. Como la transición de Curie ocurre a una temperatura alta, el uso de aditivos en el $BaTiO_3$ ayuda a desplazar la temperatura de transición de Curie a temperaturas más bajas. También se pueden usar aditivos para ampliar la transición de Curie. Materiales como el $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, o PMN, se conocen como *ferroeléctricos relajantes.*

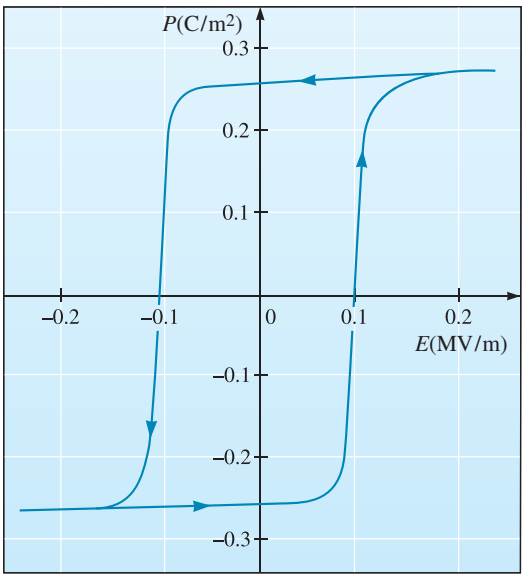


Figura 19-24 Ciclo de histéresis ferroeléctrico para un cristal de dominio individual de $BaTiO_3$. (*De* Electroceramics: Material, Properties, Applications, *por A.J. Moulson y J.M. Herbert*, *Chapman and Hall, Kluwer Academic Publishers, 1990.*)

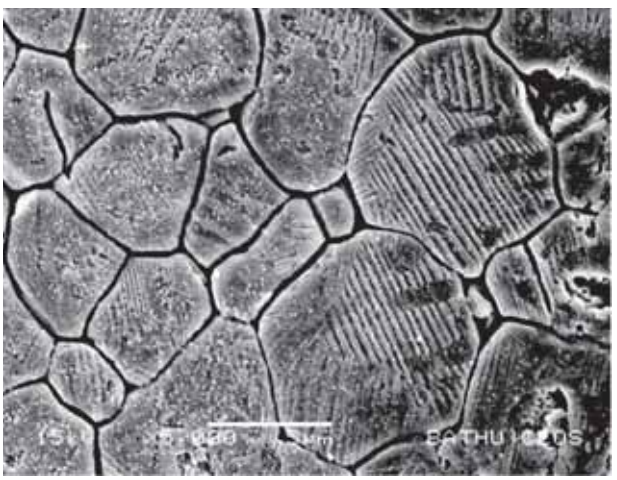


Figura 19-25 Pueden verse dominios ferroeléctricos en la microestructura del $BaTiO_3$ policristalino. (*Cortesía del profesor Chris Bowen.*)

Estos materiales muestran constantes dieléctricas muy altas (hasta de 20,000) y buen comportamiento piezoeléctrico, de modo que se usan para fabricar condensadores y dispositivos piezoeléctricos.

Ejemplo 19-8 *Diseño de un condensador multicapa*

Se va a diseñar un condensador multicapa usando una fórmula de $BaTiO_3$ que contiene $SrTiO_3$. La constante dieléctrica del material es de 3000. Calcule la capacitancia de un condensador multicapa formado por 100 capas conectadas en paralelo que usa electrodos de níquel. El área de cada capa es de 10 mm $\times$ 5 mm y el grueso de cada capa es de 10 μm.

SOLUCIÓN

La capacitancia de un condensador de placas paralelas está dada por

$$C = \frac{k\varepsilon_0 A}{t}$$

Por lo tanto, la capacitancia por capa será

$$C_{\text{capa}} = \frac{(3000)(8.85 \times 10^{-12}\,\text{F/m})(10 \times 10^{-3}\,\text{m})(5 \times 10^{-3}\,\text{m})}{10 \times 10^{-6}\,\text{m}}$$

$$C_{\text{capa}} = 13.28 \times 10^{-8}$$

Se tienen 100 capas conectadas en paralelo. Las capacitancias se suman en esta configuración. En este caso todas las capas tienen las mismas dimensiones geométricas.

$$C_{\text{total}} = (\text{número de capas}) \cdot (\text{capacitancia por capa})$$

$$C_{\text{total}} = (100)(13.28 \times 10^{-8}\,\text{F}) = 13.28\,\mu\text{F}$$

Resumen

- Los materiales electrónicos incluyen aislantes, dieléctricos, conductores, semiconductores y superconductores. Estos materiales se pueden clasificar con base en las estructuras de sus bandas. Los materiales electrónicos han hecho posibles numerosas tecnologías, que van desde aislantes para líneas de alta tensión hasta celdas solares, chips para computadoras y muchos sensores y activadores.
- Entre las propiedades más importantes de los conductores están la conductividad y la dependencia de la conductividad en la temperatura. En metales puros, la resistividad aumenta con la temperatura. La resistividad es sensible a impurezas y a defectos microestructurales como los límites de grano. La resistividad de las aleaciones por lo general es mayor que la de los metales puros.
- Los semiconductores tienen conductividades entre las de los aislantes y los conductores y son conductores mucho menos eficientes que los metales. Las conductividades de los semiconductores pueden alterarse en órdenes de magnitud por cantidades muy pequeñas de ciertos dopantes. Los semiconductores pueden clasificarse en elementales (Si, Ge) o compuestos (GaN, InP, GaAs). Estos dos pueden ser intrínsecos o extrínsecos (tipo *n* o tipo *p*). Algunos semiconductores tienen brechas de banda directas (por ejemplo, el GaAs), mientras que otros tienen brechas de banda indirectas (por ejemplo, el Si).
- La creación de una región tipo *n* en un semiconductor tipo *p* (o viceversa) forma una unión *p*-*n*. La unión *p*-*n* se usa para fabricar diodos y transistores.
- La fabricación de microelectrónicos abarca cientos de procesos de precisión capaces de producir cientos de millones e incluso mil millones de transistores en un solo microchip.
- Las películas delgadas son componentes integrales de los dispositivos de microelectrónica y también se usan para recubrimientos resistentes al desgaste y antirreflejantes. Se pueden depositar películas delgadas usando una amplia variedad de técnicas, que incluyen la deposición física de vapor, la deposición química de vapor y la electrodeposición.
- Los materiales iónicos conducen electricidad por medio del movimiento de iones o electrones y orificios.
- Los dieléctricos tienen brechas de banda grandes y no conducen electricidad. En los aislantes, el interés principal está en el voltaje de ruptura o campo. En el caso de los dieléctricos, la atención se centra en la constante dieléctrica, la frecuencia y la dependencia en la temperatura. Los mecanismos de polarización en materiales dictan esta dependencia.
- En los piezoeléctricos, la aplicación de esfuerzo da por resultado la aparición de un voltaje; la aplicación de un voltaje causa deformación.
- Los ferroeléctricos son materiales que muestran una polarización reversible y espontánea. El $BaTiO_3$, el PZT y el PVDF son ejemplos de ferroeléctricos. Los ferroeléctricos exhiben una constante dieléctrica grande y con frecuencia se usan para fabricar condensadores.

Glosario

Banda de conducción Niveles de energía no ocupados, hacia los que los electrones se excitan para obtener conductividad.

Banda de valencia Niveles de energía llenados por electrones en sus estados más bajos de energía.

Brecha de banda Rango de valores de energía en el que no hay niveles permitidos de energía de electrones (excepto los atribuidos a la presencia de impurezas). Estos valores se sitúan entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción.

Brecha de energía Rango de valores de energía en el que no hay niveles permitidos de energía de electrones (excepto los atribuidos a la presencia de impurezas). Estos valores se sitúan entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción.

Campo eléctrico Gradiente de voltaje o volts por unidad de longitud.

Ciclo de histéresis Ciclo recorrido por la polarización no lineal en un material ferroeléctrico cuando se alterna un campo eléctrico. Un ciclo similar ocurre en ciertos materiales magnéticos.

Circuito integrado Paquete electrónico que contiene en un solo chip un gran número de dispositivos electrónicos fabricados.

Condensador Dispositivo capaz de almacenar carga eléctrica. Por lo general consta de dos electrodos con un material dieléctrico colocado entre ellos, pero incluso un vacío de aire puede servir como dieléctrico. Un condensador puede tener una sola capa o multicapas.

Constante dieléctrica (k) Relación entre la permisividad de un material y la permisividad del vacío, la cual describe la capacidad relativa de dicho material a polarizarse y almacenar una carga; es igual que la permisividad relativa.

Densidad de corriente Corriente que fluye por unidad de área de sección transversal.

Deposición electrónica Proceso de crecimiento de película delgada por medio del que átomos de un gas son ionizados y luego acelerados por un campo eléctrico hacia la fuente, u "objeto fuente", de material a ser depositado. Estos iones expulsan átomos de la superficie del objeto fuente, algunos de los cuales son depositados luego en un sustrato. La deposición electrónica es un tipo de proceso de deposición física de vapor.

Deposición física de vapor (DFV) Proceso de crecimiento de película delgada en el que vapor a baja presión suministra el material a ser depositado en un sustrato. La deposición electrónica es un ejemplo de DFV.

Deposición química de vapor (DQV) Proceso de crecimiento de película delgada en el que los gases experimentan una reacción en una cámara de vacío caliente para crear el producto deseado en un sustrato.

Dieléctricos lineales Materiales en los que la polarización directa está linealmente relacionada con el campo eléctrico; la constante dieléctrica no depende del campo eléctrico.

Dieléctricos no lineales Materiales en los que la polarización dieléctrica no está linealmente relacionada con el campo eléctrico (por ejemplo, ferroeléctricos). Tienen una constante dieléctrica dependiente del campo.

Dopado Adición deliberada de cantidades controladas de otros elementos para incrementar el número de portadores de carga en un semiconductor.

Electrodeposición Método para depositar materiales en los que una fuente y una pieza de trabajo se conectan eléctricamente y se sumergen en un electrolito. Se aplica un voltaje entre la fuente y la pieza de trabajo y los iones de la fuente se disuelven en el electrolito, se mueven hacia la pieza de trabajo y gradualmente depositan una película delgada en su superficie.

Electroestricción Cambio en dimensiones que ocurre en cualquier material cuando un campo eléctrico actúa sobre él.

Energía de Fermi Nivel de energía en el que la probabilidad de hallar un electrón es de 1/2.

Estructura de bandas La estructura de banda está formada por la distribución de niveles de energía disponibles o prohibidos para ser ocupados por los electrones, y determina el comportamiento electrónico de un sólido, ya sea conductor, semiconductor o aislante.

Ferroeléctrico Material que presenta polarización dieléctrica espontánea y reversible.

Movilidad Facilidad con que se mueve un portador de carga a través de un material.

Orificios Niveles de energía no ocupados en la banda de valencia. Debido a que los electrones se mueven para ocupar los orificios, éstos producen una corriente.

Película delgada Recubrimiento o capa que es pequeña o delgada en una dimensión. Los grosores comunes varían de 10 Å a unos cuantos micrones, dependiendo de la aplicación.

Pérdida dieléctrica Medida de la energía eléctrica perdida debido al movimiento de cargas que responden al campo eléctrico por medio de diferentes mecanismos de polarización. Esta energía aparece como calor.

Permisividad Capacidad de un material para polarizarse y almacenar una carga dentro de sí.

Piezoeléctricos Materiales que desarrollan un voltaje con la aplicación de un esfuerzo y desarrollan deformaciones cuando se les aplica un campo eléctrico.

Polarización directa Conexión de un dispositivo de unión *p-n*, de tal manera que el lado *p* está conectado al positivo, lo que permite el flujo de corriente.

Polarización inversa Conexión de un dispositivo de unión, de manera que el lado *p* está conectado a un terminal negativo; muy poca corriente pasa por una unión *p-n* bajo polarización inversa.

Polarización Movimiento de entidades cargadas (es decir, nube de electrones, iones, dipolos y moléculas) en respuesta a un campo eléctrico.

Propiedad sensible a la microestructura Propiedades que dependen de la microestructura de un material (por ejemplo, conductividad, constante dieléctrica o resistencia a la fluencia).

Recombinación no radiante Generación de calor cuando un electrón pierde energía y cae de la banda de conducción a la banda de valencia para ocupar un orificio; esto ocurre principalmente en materiales de brecha de banda indirecta, como el Si.

Recombinación radiante Emisión de luz cuando un electrón pierde energía y cae de la banda de conducción a la banda de valencia para ocupar un orificio; esto ocurre en materiales de brecha de banda directa como el GaAs.

Rectificador Dispositivo de unión *p-n* que permite que fluya corriente sólo en una dirección en un circuito.

Regla de Matthiessen La resistividad de un metal está determinada por la adición de una resistividad base que responde al efecto de la temperatura, y un término independiente de la temperatura que refleja el efecto de los defectos de nivel atómico, incluyendo solutos que forman soluciones sólidas.

Resistencia dieléctrica Máximo campo eléctrico que puede mantenerse entre dos placas conductoras sin causar una ruptura.

Semiconductor extrínseco Semiconductor preparado por medio de la adición de contaminantes (dopantes) que determina el número y tipo de portadores de carga. El comportamiento extrínseco también puede verse debido a impurezas.

Semiconductor intrínseco Semiconductor cuyas propiedades están controladas por el elemento o compuesto que es el semiconductor y no por contaminantes o impurezas.

Superconductor Material que exhibe cero resistencia eléctrica bajo ciertas condiciones.

Temperatura de Curie Temperatura por encima de la cual un ferroeléctrico ya no es piezoeléctrico.

Termistor Dispositivo semiconductor que es particularmente sensible a los cambios en la temperatura, lo cual le permite servir como medida precisa de la temperatura.

Transistor Dispositivo semiconductor que amplifica o conmuta señales eléctricas.

Trayectoria libre media Distancia media que los electrones se mueven sin ser dispersados por otros átomos o defectos de red.

Unión *p-n* Dispositivo fabricado para crear una región tipo *n* en un material tipo *p* (o viceversa). Una unión *p-n* se comporta como diodo y las funciones *p-n* múltiples funcionan como transistores. También es la base de los LED y las celdas solares.

Velocidad de deriva Rapidez media a la que se mueven electrones u otros portadores de carga por un material, bajo la influencia de un campo eléctrico o magnético.

Problemas

Sección 19-1 Ley de Ohm y conductividad eléctrica

Sección 19-2 Estructura de las bandas de sólidos

Sección 19-3 Conductividad de metales y aleaciones

19-1 De los metales listados en la tabla 19-1, ¿cuáles son los más y los menos conductivos?

19-2 Determine la resistencia de una fibra con un área transversal de 1.34 mm^2 y una longitud de 10 cm que se somete a una tensión de 225 V para la que la densidad de corriente es 1.25 A/cm^2. Suponga que el material y las propiedades del resistor son uniformes.

19-3 Un alambre de dos micras de diámetro se fabrica de 10 cm de plata, 0.1 cm de galio y 10 cm de plata, todo unido de extremo a extremo (es decir, en serie). Suponga las uniones son perfectas

y no tienen ninguna resistencia adicional. ¿Cuál es la resistencia total del alambre?

19-4 Se hace pasar una corriente de 10 A por un alambre de 1 mm de diámetro y 1000 m de longitud. Calcule la pérdida de energía si el alambre está hecho de *a*) aluminio y *b*) silicio (consulte la tabla 19-1).

19-5 Una fibra de nitruro de boro, de 0.5 mm de diámetro y 1 cm de largo, se coloca en un circuito de 120 Ω. Con ayuda de la tabla 19-1, calcule
a) la corriente que fluye en el circuito, y
b) el número de electrones que pasan en un segundo por la fibra de nitruro de boro.
c) ¿Cuáles serían la corriente y el número de electrones si la fibra estuviera hecha de magnesio en lugar de nitruro de boro?

19-6 La potencia perdida en un alambre de cobre de 2 mm de diámetro debe ser menor de 250 W cuando una corriente de 5 A está circulando en el circuito. ¿Cuál es la longitud máxima del alambre?

19-7 Se aplica una densidad de corriente de 100,000 A/cm^2 a un alambre de oro de 50 m de largo. Se encuentra que la resistencia del alambre es de 2 ohms. Calcule el diámetro del alambre y el voltaje aplicado al alambre.

19-8 Se desea producir un resistor de 5000 ohms hecho de fibra de boro-carburo con un diámetro de 0.1 mm. ¿Cuál es la longitud requerida de la fibra?

19-9 La plata (Ag) tiene una conductividad eléctrica de $6.80 \times 10^5\ \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. El oro (Au) tiene una conductividad eléctrica de $4.26 \times 10^5\ \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Calcule el número de portadores de carga por unidad de volumen y la movilidad de los electrones en cada uno de ellos para considerar esta diferencia en la conductividad eléctrica. Comente sobre sus hallazgos.

19-10 Si la densidad de corriente es 1.25 A/cm^2 y la velocidad de deriva es 10^7 cm/s, ¿cuántos portadores de carga están presentes?

19-11 Se aplica una densidad de corriente de 5000 A/cm^2 a un alambre de magnesio. Si la mitad de los electrones de valencia actúan como portadores de carga, calcule la velocidad de deriva media de los electrones.

19-12 Se aplica un voltaje de 10 V a un alambre de aluminio de 2 mm de diámetro y 20 m de largo. Si 10% de los electrones de valencia transportan la carga eléctrica, calcule la velocidad de deriva media tanto en km/h como en millas por hora.

19-13 En un proceso de soldadura circula una corriente de 400 A por el arco cuando existe un voltaje de 35 V. La longitud del arco es de aproximadamente 0.25 cm y el promedio del diámetro es cercano a 0.45 cm. Calcule la densidad de corriente en el arco, el campo eléctrico a través del mismo y la conductividad eléctrica de los gases calientes en el arco durante la operación de soldadura.

19-14 Trace un diagrama esquemático de las estructuras de banda de un aislante, un semiconductor y un material metálico. Utilice el diagrama para explicar por qué disminuye la conductividad de los metales puros cuando aumenta la temperatura, en tanto que ocurre lo contrario para los semiconductores y aislantes.

19-15 El grosor típico de un conductor de cobre (conocido como interconector) en un circuito integrado es de 250 nm. La trayectoria libre media de los electrones en el cobre puro recocido es de alrededor de 40 nm. Cuando el grosor de los interconectores de cobre se aproxima a la trayectoria libre media, ¿cómo se espera que resulte afectada la conducción en el interconector? Explique.

19-16 Calcule las resistividades del cobalto y el berilio a 505 K.

19-17 Calcule la conductividad eléctrica del platino a −200°C.

19-18 Calcule la conductividad eléctrica del níquel a −50°C y a +500°C.

19-19 Se encuentra que la resistividad eléctrica del cromo puro es de 18×10^{-6} ohm · cm. Estime la temperatura a la que se realizó la medición de la resistividad.

19-20 Después de determinar la conductividad eléctrica del cobalto a 0°C, se decidió que se duplicaría la conductividad. ¿A qué temperatura se debe enfriar el metal?

19-21 A partir de la figura 19-9*b*), estime el coeficiente de resistividad de los defectos para el estaño en cobre.

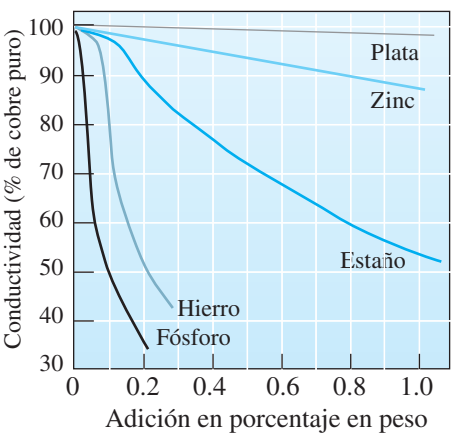


Figura 19-9*b*) Efecto de la adición de elementos seleccionados en la conductividad eléctrica del cobre. (Repetida para el problema 19-9.)

19-22 Calcule la resistividad del paladio a 443°C si tiene un contribución de defectos de 1.02×10^{-7} ohm · cm.

19-23 *a*) El cobre y el níquel forman una solución sólida completa. Trace un diagrama que ilustre la resistividad de una aleación de cobre y níquel como función del porcentaje atómico del níquel. Comente por qué la curva tiene tal forma.

b) El cobre y el oro no forman una solución sólida completa. En las composiciones de 25 y 50 de porcentaje atómico de oro se forman fases ordenadas de Cu_3Au y CuAu, respectivamente. ¿Esperaría usted que una gráfica de la resistividad de una aleación de cobre y oro como función del porcentaje atómico del oro tuviera una forma similar al trazo del inciso *a*)? Explique.

19-24 La resistividad eléctrica de una aleación de berilio que contiene 5% de átomos de un elemento de aleación es de 50×10^{-6} ohm · cm a 400°C. Determine las contribuciones a la resistividad debidas a la temperatura y a las impurezas, encontrando la resistividad esperada en el berilio puro a 400°C, la resistividad correspondiente a las impurezas y el coeficiente de resistividad por defectos. ¿Cuál sería la resistividad eléctrica a 200°C si el berilio tuviera 10% de átomos del elemento de aleación?

Sección 19-4 Semiconductores

Sección 19-5 Aplicaciones de los semiconductores

Sección 19-6 Repaso general del procesamiento de un circuito integrado

Sección 19-7 Deposición de películas delgadas

19-25 Explique los términos siguientes: semiconductor, semiconductor intrínseco, semiconductor extrínseco, semiconductor elemental, semiconductor compuesto, semiconductor de brecha de banda directa y semiconductor de brecha de banda indirecta.

19-26 ¿Qué son una recombinación radiante y una no radiante? ¿Qué tipos de materiales se usan para fabricar los LED?

19-27 Reporte el rango de temperatura (en°C) para el cual la muestra de la figura 19-15 se comporta como un semiconductor extrínseco.

19-28 Para el germanio y el silicio, compare, a 25°C, el número de portadores de carga por centímetro cúbico, la fracción del total de electrones de la banda de valencia que son excitados hacia la banda de conducción y la constante n_0.

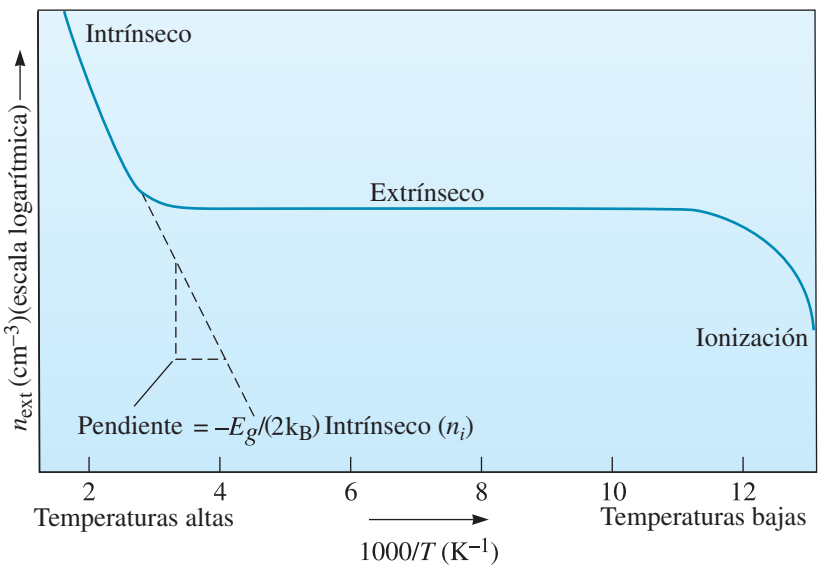


Figura 19-15 Efecto de la temperatura en la concentración de portadores de un semiconductor de tipo *n*. A bajas temperaturas, los átomos donadores o aceptantes no se ionizan. A medida que aumenta la temperatura, el proceso de ionización es completo, y la concentración de portadores aumenta a un nivel que es dictado por el nivel de dopaje. La conductividad entonces se mantiene fundamentalmente sin cambios hasta que la temperatura llega a ser demasiado alta y los portadores generados térmicamente comienzan a dominar. El efecto de los dopantes se pierde a temperaturas muy altas y el semiconductor muestra en esencia el comportamiento "intrínseco". (Repetida para el problema 19-27.)

19-29 Para el germanio y el silicio, compare las temperaturas requeridas para duplicar las conductividades eléctricas a partir del valor de la temperatura ambiente.

19-30 Determine la conductividad eléctrica del silicio cuando se agrega 0.0001 de porcentaje atómico de antimonio como dopante y compárela con la conductividad eléctrica cuando se agrega 0.0001 de porcentaje atómico de indio.

19-31 Se desea producir un semiconductor de germanio extrínseco que tenga una conductividad eléctrica de 2000 $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Determine la cantidad de fósforo y de galio requeridas para fabricar semiconductores tipo *n* y tipo *p*, respectivamente.

19-32 Estime la conductividad eléctrica del silicio dopado con 0.0002% de átomos de arsénico a 600°C, que está arriba de la meseta de la curva de conductividad-temperatura.

19-33 Determine la cantidad de arsénico que debe combinarse con 1 kg de galio para fabricar un semiconductor tipo *p* con una conductividad eléctrica de 500 $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ a 25°C. El parámetro de red del GaAs es de alrededor de 5.65 Å, y el GaAs tiene una estructura de blenda de zinc.

19-34 Calcule la concentración de portadores intrínsecos para el GaAs a temperatura ambiente. Dado que la masa efectiva de los electrones en el GaAs es de $0.067m_e$, donde m_e es la masa del electrón, calcule la masa efectiva de los orificios.

19-35 Calcule la conductividad eléctrica del silicio dopado con 10^{18} cm^{-3} de boro a temperatura ambiente. Compare la concentración de portadores intrínsecos contra la concentración del dopante.

19-36 A temperatura ambiente, ¿la conductividad del silicio dopado con 10^{17} cm^{-3} de arsénico es mayor, igual o menor que la conductividad del silicio dopado con 10^{17} cm^{-3} de fósforo?

19-37 Cuando se aplica un voltaje de 5 mV al emisor de un transistor, se produce una corriente de 2 mA. Cuando el voltaje aumenta a 8 mV, la corriente que pasa por el colector aumenta a 6 mA. ¿Qué porcentaje se incrementará la corriente del colector cuando el voltaje del emisor se duplique, de 9 mV a 18 mV?

19-38 Diseñe un diodo emisor de luz que emita a 1.12 micrometros. ¿Esta longitud de onda está en la escala visible? ¿Cuál es una aplicación potencial para este tipo de LED?

19-39 ¿Cómo se pueden fabricar LED que emitan luz blanca (es decir, luz que se asemeja a la luz solar)?

19-40 Investigue la relación de escala conocida como Ley de Moore. ¿Se espera que esta tendencia continúe en el futuro aplicando técnicas establecidas de fabricación de microelectrónicos? Si no es así, ¿cuáles son algunas de las alternativas que se consideran en la actualidad? Elabore una lista de las obras de consulta o los sitios web que haya consultado.

19-41 El silicio es el mejor material para el sustrato de circuitos integrados. Explique por qué el silicio se prefiere sobre el germanio, aun cuando las movilidades de electrones y orificios son mucho más altas y la brecha de banda es mucho menor para el germanio que para el silicio. Elabore una lista de las obras de consulta o los sitios web que haya consultado.

Sección 19-8 Conductividad en otros materiales

19-42 Si se desea que la resistividad de un nylon sea de 10^4 ohm · cm, ¿qué porcentaje de peso debe añadirse a las fibras de carbono?

19-43 Calcule la conductividad eléctrica de una pieza de polietileno reforzada con fibras que es reforzada con 20% en volumen de fibras de níquel alineadas y continuas.

19-44 ¿Qué son los conductores iónicos? ¿Cuáles son sus aplicaciones?

19-45 ¿Cómo funcionan algunas computadoras equipadas con pantallas táctiles?

19-46 ¿Los polímeros pueden ser semiconductores? ¿Cuáles serían las ventajas de usar éstos en lugar de silicio?

Sección 19-9 Aislantes y propiedades dieléctricas

Sección 19-10 Polarización en dieléctricos

19-47 En relación con el comportamiento mecánico, se ha visto que el esfuerzo (una causa) produce una deformación (un efecto). ¿Cuál es el análogo eléctrico de esto?

19-48 En relación con el comportamiento mecánico, el módulo elástico representa la energía elástica almacenada, en tanto que la disipación viscosa representa la energía mecánica perdida en deformación. ¿Cuál es el análogo eléctrico para esto?

19-49 Calcule el desplazamiento de electrones o iones para las siguientes condiciones:

a) polarización electrónica en níquel de 2×10^{-7} C/m^2,

b) polarización electrónica en aluminio de 2×10^{-8} C/m^2,

c) polarización iónica en NaCl de 4.3×10^{-8} C/m^2, y

d) polarización iónica en ZnS de 5×10^{-8} C/m^2.

19-50 Se utiliza un dieléctrico de alúmina de 2 mm de grueso en un circuito de 60 Hz. Calcule el volta-

je necesario para producir una polarización de 5×10^{-7} C/m^2.

19-51 Suponga que es posible producir una polarización de 5×10^{-8} C/m^2 en un cubo (5 mm por lado) de titanato de bario. Asuma una constante dieléctrica de 3000. ¿Qué voltaje se produce?

19-52 Para los 14 materiales con una resistencia dieléctrica y resistividad listadas en la tabla 19-7, trace la resistencia dieléctrica en función de la resistividad. Asuma valores promedio para los rangos de resistividad.

19-53 ¿Qué mecanismo de polarización estará presente en *a*) alúmina, *b*) cobre, *c*) silicio y *d*) titanato de bario?

Sección 19-11 Electroestricción, piezoelectricidad y ferroelectricidad

19-54 Defina los términos siguientes: electroestricción, piezoelectricidad (defina sus efectos directo e inverso) y ferroelectricidad.

19-55 Calcule la capacitancia de un condensador de placas paralelas que contiene cinco capas de mica, para el cual la hoja de mica es de $1 \times 2 \times 0.005$ cm. Las capas están conectadas en paralelo.

19-56 Un condensador multicapas ha de diseñarse usando una formulación ferroeléctrica relajante basada en el niobato de plomo magnesio (PMN). La constante dieléctrica aparente del material es de 20,000. Calcule la capacitancia de un condensador multicapas formado por 10 capas conectadas en paralelo que usa electrodos de Ni. El área del condensador es de 10×10 mm y el grueso de cada capa es de 20 μm.

19-57 Se aplica una fuerza de 90 N a la cara de un cristal de cuarzo de $0.5 \times 0.5 \times 0.1$ cm de grueso. Determine el voltaje producido por la fuerza. El módulo de elasticidad del cuarzo es de 72×10^3 MPa.

19-58 Para el ejemplo de ciclo de histéresis de la figura 19-24, ¿cuál es la polarización (C/m^2) si el campo eléctrico comienza en 0.2 MV/m y cae a cero?

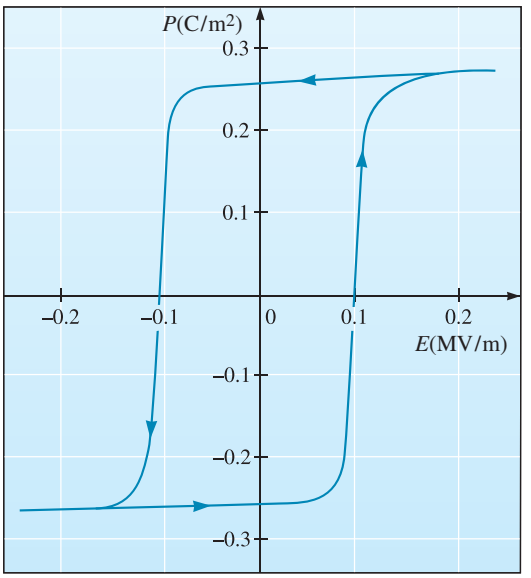


Figura 19-24 Ciclo de histéresis ferroeléctrico para un solo cristal de dominio único de $BaTiO_3$. (*De* Electroceramics: Materials, Propperties, Applications, *por A.J. Moulson y J.M. Herbert, Chapman y Hall, Kluwer Academic Publishers, 1990*). (Repetida para el problema 19-58.)

Problemas de diseño

19-59 Se desea fabricar un resistor de 100 ohms usando un alambre delgado de un material. Diseñe tal dispositivo.

19-60 Diseñe un condensador que sea capaz de almacenar 1 μF cuando se le aplican 100 V.

19-61 Diseñe un compuesto de matriz epóxica que tenga un módulo de elasticidad de por lo menos 240×10^3 MPa y una conductividad eléctrica de por lo menos 1×10^5 ohm$^{-1} \cdot$ cm^{-1}.

Problemas por computadora

19-62 *Diseño de condensadores multicapas.* Edite un programa de cómputo que pueda usarse para calcular la capacitancia de un condensador multicapas. El programa, por ejemplo, debe pedirle al usuario que proporcione valores de la constante dieléctrica y de las dimensiones de la capa. El programa debe también ser flexible para que, dado el caso, si el usuario proporciona un valor pretendido de la capacitancia y otras dimensiones, el programa muestre la constante dieléctrica requerida.

Problemas Knovel[MR]

K19-1 Calcule la resistividad del iridio puro a 673 K usando su coeficiente de resistividad de temperatura.

K19-2 La conductividad está dada a veces en las unidades de %IACS. ¿Qué significan las iniciales IACS? Defina la unidad usando la información encontrada.

K19-3 ¿Los materiales orgánicos, como los polímeros y los nanotubos de carbono, pueden ser semiconductores? Si lo son, ¿qué determina sus propiedades como semiconductores?

Un disco duro magnético es el corazón de muchas computadoras y de todos los centros de datos a gran escala, por ejemplo los que son administrados por Facebook y Amazon. Estos discos usan materiales magnéticos que presentan características únicas en cuanto a que la información puede escribirse fácilmente en ellos, pero no se puede borrar con la misma facilidad. El sistema de un disco duro es complejo porque usa materiales magnéticos de película delgada nanoestructurados y a nanoescala para almacenar información. (*Photodisc Greeny Getty Images*)

CAPÍTULO

20

Materiales magnéticos

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Qué afecta la "fuerza elevadora" de un imán?*
- *¿Cuáles son los materiales magnéticos "suaves" y "duros"?*
- *¿Existen materiales "no magnéticos"?*
- *¿Existen materiales que sufren deformación mecánica al someterlos a un campo magnético?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Definir los términos ferromagnético, ferrimagnético, paramagnético, diamagnético, antiferromagnético y superparamagnético.
- Explicar la base física para el comportamiento magnético de elementos a partir del espín del electrón y el movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo.
- Calcular el campo magnético y la inductancia magnética.
- Definir los términos permeabilidad magnética del vacío, permeabilidad relativa de un material y susceptibilidad magnética.
- Describir el movimiento de dominios en un campo magnético y el cambio consecuente en la magnetización debido a un incremento del campo magnético aplicado.
- Identificar la magnetización de saturación, la remanencia y el campo coercitivo en los ciclos de histéresis ferromagnéticos.

Todos los materiales en el mundo responden a la presencia de un campo magnético. Los materiales magnéticos se usan para construir cosas como motores eléctricos, generadores y transformadores. Gran parte de la tecnología de almacenamiento de datos (discos duros de computadoras, discos compactos de computadora y otros semejantes) se basa en las partículas magnéticas. Los materiales magnéticos también se usan en altavoces, micrófonos, teléfonos fijos y reproductores de cintas de video. Los materiales magnéticos, por ejemplo las partículas de óxido de hierro (Fe_3O_4), se usan para hacer composiciones exóticas de "imanes líquidos" o ferrofluidos. Las mismas partículas de óxido de hierro se usan para fijar moléculas de ADN, células y proteínas.

En este capítulo se analiza la base fundamental de las respuestas de ciertos materiales a la presencia de campos magnéticos. También se analizan las propiedades y aplicaciones de diferentes tipos de materiales magnéticos.

20-1 Clasificación de los materiales magnéticos

Estrictamente hablando, no existe ningún material "no magnético". Todo está formado por átomos, y los átomos están formados por electrones que giran alrededor de los átomos, de un modo parecido a una espira portadora de corriente que genera un campo magnético. Entonces, toda la materia responde a un campo magnético. La forma en que se mide la escala de esta respuesta de los electrones y los átomos de un material determina si es muy magnético o poco magnético, y también da lugar a muchos tipos de fenómenos. Ejemplos de materiales **ferromagnéticos** son el Fe, el Ni, el Co y algunas de sus aleaciones. Ejemplos de materiales **ferrimagnéticos** incluyen numerosos materiales cerámicos, como la ferrita de níquel zinc y la ferrita de manganeso zinc. Por lo general, el término "no magnético" significa que el material no es ferromagnético ni ferrimagnético. Estos materiales "no magnéticos" se clasifican además como **diamagnéticos** (por ejemplo, superconductores) o **paramagnéticos**. En algunos casos también se encuentran materiales que son **antiferromagnéticos** o **superparamagnéticos**. Más adelante en el capítulo se verán estas clases de materiales y sus aplicaciones. Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos suelen subclasificarse como materiales magnéticos blandos o duros. Los aceros al carbono puro o al hierro de alta pureza son ejemplos de material magnéticamente blando porque pueden magnetizarse, pero cuando la fuente magnetizante se retira pierden el comportamiento semejante al de un imán.

Los **imanes permanentes** o **materiales magnéticos duros** retienen su magnetización. Éstos son "imanes" permanentes. Se usan muchas ferritas cerámicas al fabricar imanes de bajo costo para refrigeradores. Un material magnético duro no pierde con facilidad su comportamiento magnético.

20-2 Dipolos magnéticos y momentos magnéticos

El comportamiento magnético de los materiales puede encontrarse en la estructura de los átomos. El movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo y el espín del electrón alrededor de su propio eje (figura 20-1) causan momentos magnéticos separados. Estos dos movimientos (es decir, espín y orbital) contribuyen al comportamiento magnético de los materiales. Cuando el electrón gira, hay un momento magnético asociado con ese movimiento. El **momento magnético** de un electrón debido su giro se conoce como **magnetón de Bohr** (μB). Esta es una constante fundamental y se define como

$$\mu_B = \text{Magnetón de Bohr} = \frac{q\text{h}}{4\pi m_e} = 9.274 \times 10^{-24}\,\text{A}\cdot\text{m}^2 \tag{20-1}$$

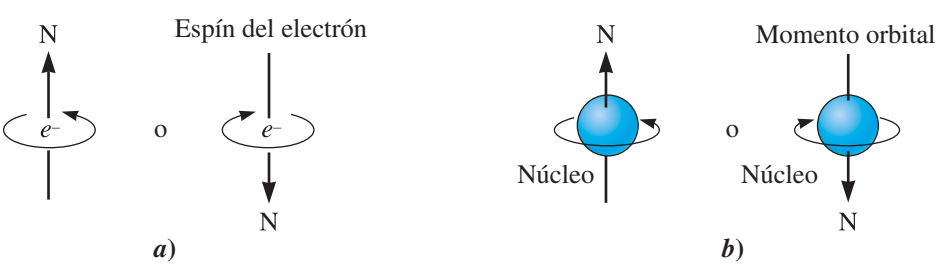


Figura 20-1 Origen de los dipolos magnéticos: *a*) El espín del electrón produce un campo magnético con una dirección que depende del número cuántico m_s. *b*) Los electrones que giran en órbita alrededor del núcleo crean un campo magnético alrededor del átomo.

donde q es la carga del electrón, h la constante de Planck y m_e la masa del electrón. Este momento está dirigido a lo largo del eje del espín del electrón.

El núcleo del átomo está formado por protones y neutrones. Éstos también tienen un espín, pero el momento magnético total debido a su espín es mucho menor que el de los electrones. Normalmente los efectos del momento magnético de un núcleo no se encuentran más que en aplicaciones como la resonancia magnética nuclear (RMN).

Se pueden considerar los electrones en los materiales como pequeños imanes elementales. Si los momentos magnéticos debidos a los electrones en los materiales pudieran alinearse en la misma dirección, la Tierra sería un sitio magnético. No obstante lo anterior, como usted sabe, este no es el caso. Entonces, debe existir algún mecanismo por el que los momentos magnéticos asociados con el espín del electrón y su movimiento orbital se cancelan en la mayoría de los materiales, dejando atrás sólo unos cuantos materiales que son "magnéticos". Hay dos efectos que, por fortuna, hacen que la mayoría de los materiales en el mundo no sean "magnéticos".

En primer lugar, se debe considerar el momento magnético de los átomos. Con base en el principio de exclusión de Pauli, dos electrones dentro en un mismo orbital deben tener espines opuestos. Esto significa que los momentos magnéticos derivados de su espín electrónico tienen signos opuestos (uno puede considerarse "ascendente ↑" y el otro "descendente ↓") y se cancelan. El segundo efecto es que los momentos orbitales de los electrones también se cancelan entre sí. Así, en una capa llena por completo, el espín de todos los electrones y los momentos orbitales se cancelan. Esta es la razón por la que los átomos de casi todos los elementos carecen de un momento magnético neto. Algunos elementos, por ejemplo los elementos de transición (3*d*, 4*d*, 5*d* parcialmente llenos), los lantánidos (4*f* parcialmente lleno) y los actínidos (5*f* parcialmente llenos), tienen un momento magnético neto debido a un electrón impar.

Ciertos elementos, como los metales de transición, tienen un nivel interior de energía que no está lleno por completo. Los elementos del escandio (Sc) al cobre (Cu), de los cuales se muestran las estructuras electrónicas en la tabla 20-1, son típicos. Excepto el cromo y el cobre, los electrones de valencia en el nivel 4*s* están en pares; los electrones impares en el cromo y el cobre se cancelan por interacciones con otros átomos. El cobre tiene una capa 3*d* llena por completo y, por lo tanto, no presenta un momento magnético neto.

Los electrones del nivel 3*d* de los elementos de transición restantes no entran a las capas en pares. En vez de ello, como en el manganeso, los primeros cinco electrones tienen el mismo espín. Sólo después de que se llena la mitad del nivel 3*d* se formarán pares con espines opuestos. Por lo tanto, cada átomo en un metal de transición tiene un momento magnético permanente, el cual está relacionado con el número de electrones impares. Cada átomo se comporta como un dipolo magnético.

Estos momentos magnéticos para átomos individuales libres existen en muchos elementos, pero cuando los átomos forman materiales cristalinos estos momentos se "apagan" o cancelan. Entonces, varios materiales hechos de elementos con átomos que tienen un momento magnético neto no exhiben un comportamiento magnético. Por ejemplo, el ion del Fe^{+2} tiene un momento magnético

Tabla 20-1 Espines de los electrones del nivel de energía 3*d* en metales de transición, con flechas que indican la dirección del espín

Metal	3*d*					4*s*
Sc	↑					↓↑
Ti	↑	↑				↓↑
V	↑	↑	↑			↓↑
Cr	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Mn	↑	↑	↑	↑	↑	↓↑
Fe	↓↑	↑	↑	↑	↑	↓↑
Co	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	↓↑
Ni	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	↓↑
Cu	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑

de $4\mu_B$ (cuatro veces el momento magnético de un electrón); no obstante, los cristales del $FeCl_2$ no son magnéticos.

La respuesta del átomo a un campo magnético aplicado depende de la forma en que los dipolos magnéticos, representados por cada átomo, reaccionan ante el campo. La mayoría de los elementos de transición (por ejemplo Cu, Ti) reaccionan de tal manera que la suma de los momentos magnéticos de los átomos individuales es igual a cero. Sin embargo, los átomos de níquel (Ni), hierro (Fe) y cobalto (Co) sufren una "interacción de intercambio", por lo que la orientación del dipolo de un átomo influye sobre los átomos circundantes con la misma orientación bipolar, produciendo una amplificación deseable del efecto del campo magnético. En el caso del Fe, el Ni y el Co, los momentos magnéticos de los átomos se orientan en una misma dirección, y estos materiales se conocen como materiales ferromagnéticos.

En ciertos materiales, como en el cromo CCCu(Cr), los momentos magnéticos de los átomos del centro de la celda unitaria están en oposición a los momentos de los átomos de las esquinas, por lo que el momento neto es igual a cero. Aquellos materiales en los que existe una cancelación total de los momentos magnéticos en átomos o en iones se conocen como materiales antiferromagnéticos.

Los materiales en los que los momentos magnéticos de los distintos átomos o iones no se cancelan en su totalidad se conocen como materiales ferrimagnéticos. Estos materiales se analizarán en una sección posterior.

20-3 Magnetización, permeabilidad y campo magnético

Analicemos la relación entre el campo magnético y la magnetización. La figura 20-2 muestra una bobina con n espiras. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica por la bobina se produce un campo magnético H; la intensidad del campo está dada por:

$$H = \frac{nI}{l} \tag{20-2}$$

donde n es el número de vueltas, l la longitud de la bobina (m) e I la corriente (A). Por lo tanto, las unidades de H son amperes vuelta/metro, o simplemente A/m. Una unidad opcional para el campo magnético es el oersted, que se obtiene al multiplicar A/m por $4\pi\ \varepsilon\ 10^{-3}$ (tabla 20-2).

Cuando se aplica un campo magnético en un vacío, se inducen líneas de flujo magnético. La densidad de flujo, o *inductancia* B, se relaciona con el campo aplicado por medio de

$$B = \mu_0 H \tag{20-3}$$

donde B es la inductancia, H el campo magnético y μ_0 una constante llamada **permeabilidad magnética del vacío**. Si H se expresa en unidades de oersted, entonces B está en gauss y μ_0 es 1 gauss/oersted. En un conjunto alterno de unidades, H está en A/m, B está en tesla (también llamado weber/m^2) y μ_0 es $4\pi\ \varepsilon\ 10^{-7}$ weber/(A · m) (también llamada henry/m).

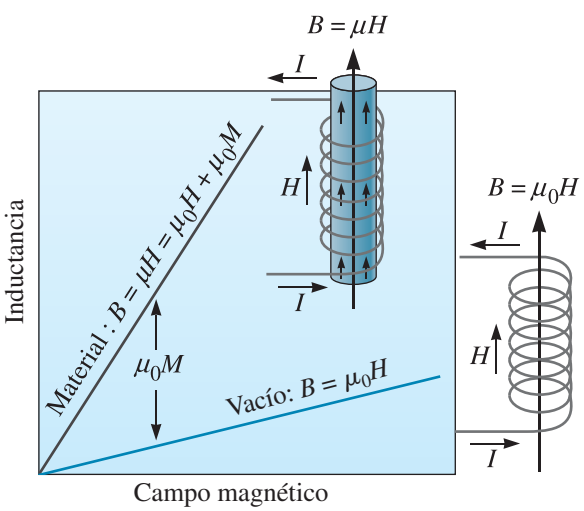


Figura 20-2 Una corriente que pasa por una bobina establece un campo magnético H con una densidad de flujo B. La densidad de flujo aumenta si se coloca un núcleo magnético dentro de la bobina.

Tabla 20-2 Unidades, conversiones y valores para materiales magnéticos

	UEM de Gauss y cgs (unidades electromagnéticas)	Unidades del SI	Conversión
Inductancia o densidad de flujo magnético (B)	gauss (G)	tesla [o weber (Wb)/m^2]	1 tesla = 10^4 G, (Wb)/m^2
Flujo magnético (ϕ)	maxwell (Mx), G · cm^2	Wb, volt-segundo	1 Wb = 10^8 G · cm^2
Diferencia de potencial magnético o fuerza electromotriz magnética (U, F)	gilbert (Gb)	ampere (A)	1 A = $4\pi \times 10^{-1}$ Gb
Fuerza del campo magnético o fuerza magnetizadora (H)	oersted (Oe), gilbert (Gb)/cm	A/m	1 A/m = $4\pi \times 10^{-3}$ Oe
(Volumen) magnetización (M)	uem/cm^3	A/m	1 A/m = 10^{-3} uem/cm^3
(Volumen) magnetización ($4\pi M$)	G	A/m	1 A/m = $4\pi \times 10^{-3}$ G
Polarización magnética o intensidad de magnetización (J o I)	uem/cm^3	T, Wb/m^2	1 tesla = $(1/4\pi) \times 10^4$ uem/cm^3
(Masa) magnetización (σ, M)	uem/g	A · m^2/kg	1 A · m^2/kg = 1 uem/g
		Wb · m/kg	1 Wb · m/kg = $(1/4\pi) \times 10^7$ uem/g
Momento magnético (m)	uem, erg/G	A · m^2, joules por tesla (J/T)	1 J/T = 10^3 uem
Momento de dipolo magnético (j)	uem, erg/G	Wb · m	1 Wb · m = $(1/4\pi) \times 10^{10}$ uem
Permeabilidad magnética (μ)	Sin dimensiones	Wb/(A · m) [henres (H)/m]	1 Wb/(A · m) = $(1/4\pi) \times 10^7$
Permeabilidad magnética del espacio libre (μ_0)	1 gauss/oersted	$\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m	
Permeabilidad relativa (μ_r)	No definido	Sin dimensiones	
(Volumen) densidad de energía, producto de energía (W)	erg/cm^3	J/m^3	1 J/m^3 = 10 erg/cm^3

Cuando se coloca un material dentro del campo magnético, la densidad del flujo magnético queda determinada por la forma en la que los dipolos magnéticos, inducidos y permanentes, interaccionan con el campo. La densidad de flujo es ahora

$$B = \mu H \tag{20-4}$$

donde μ es la permeabilidad del material dentro del campo. Si los momentos magnéticos refuerzan el campo aplicado, entonces $\mu > \mu_0$, se crea un número mayor de líneas de flujo que pueden realizar trabajo y el campo magnético se amplifica. No obstante, si los momentos magnéticos se oponen al campo, $\mu < \mu_0$.

Se puede describir la influencia del material magnético mediante la permeabilidad relativa μ_r, donde

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{20-5}$$

Una mayor permeabilidad relativa significa que el material amplifica el efecto del campo magnético. Entonces, la permeabilidad relativa tiene la misma importancia que la conductividad en los dieléctricos. Un material con una permeabilidad magnética más alta (por ejemplo, el hierro) acepta el flujo magnético con más facilidad. Posteriormente se verá que la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos o ferrimagnéticos no es constante y depende del valor del campo magnético aplicado (H).

La **magnetización** M representa el incremento de la inductancia debido al material del núcleo, de modo que la ecuación puede reescribirse para la inductancia como

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \tag{20-6}$$

La primera parte de esta ecuación es simplemente el efecto del campo magnético aplicado; la segunda es el efecto del material magnético presente. Esto es similar al análisis sobre la polarización dieléctrica y el comportamiento mecánico de los materiales. En éstos, los esfuerzos provocan deformaciones, los campos eléctricos (E) inducen una polarización dieléctrica (P) y un campo magnético (H) provoca magnetización ($\mu_0 M$) que contribuye a la densidad de flujo total B.

La **susceptibilidad magnética** χ_m, que es la razón entre la magnetización y el campo aplicado, da la amplificación producida por el material:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \tag{20-7}$$

Tanto μ_r como χ_m se refieren al grado en que el material incrementa el campo magnético y están, por lo tanto, relacionadas por

$$\mu_r = 1 + \chi_m \tag{20-8}$$

Como ya se vio, μ_r y, por lo tanto, los valores de χ_m para materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos, dependen del campo aplicado (H). Para materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos, el término $\mu_0 M >> \mu_0 H$. Entonces, para estos materiales,

$$B \cong \mu_0 M \tag{20-9}$$

A veces nos referimos indistintamente a la inductancia o a la magnetización. En general, hay interés en producir una alta inductancia B o magnetización M. Esto se logra al seleccionar materiales que tengan una permeabilidad relativa alta o una susceptibilidad magnética alta.

El siguiente ejemplo muestra la forma en que pueden aplicarse estos conceptos para comparar magnetizaciones reales y teóricas en el hierro puro.

Ejemplo 20-1 *Magnetización de saturación teórica y real en el Fe*

Calcule la magnetización máxima, o saturación, que se puede esperar en el hierro. El parámetro de red del hierro CCCu es 2.866 Å. Compare este valor con 2.1 teslas (valor de la densidad de flujo de saturación observado de manera experimental en el Fe puro).

SOLUCIÓN

Con base en los espines electrónicos impares, se espera que cada átomo de hierro tenga cuatro electrones que actúan como dipolos magnéticos. El número de átomos por m^3 en el hierro CCCu es

$$\text{Número de Fe átomos}/\text{m}^3 = \frac{2 \text{ átomos/celda}}{(2.866 \times 10^{-10}\,\text{m})^3} = 8.496 \times 10^{28}$$

La magnetización máxima por volumen (M_{sat}) es el momento magnético total por unidad de volumen:

$$M_{\text{sat}} = \left(8.496 \times 10^{28} \frac{\text{átomos}}{\text{m}^3}\right)(9.274 \times 10^{-24}\,\text{A} \cdot \text{m}^2)\left(4 \frac{\text{magnetones de Bohr}}{\text{átomo}}\right)$$

$$M_{\text{sat}} = 3.15 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Para convertir el valor de la magnetización de saturación M en densidad de flujo por saturación B en teslas es necesario conocer el valor de $\mu_0 M$. En materiales ferromagnéticos, $\mu_0 M >> \mu_0 H$ y, por lo tanto, $B > \mu_0 M$.

Entonces, la inducción por saturación o densidad de flujo por saturación en teslas está dada por $B_{\text{sat}} = \mu_0 M_{\text{sat}}$.

$$B_{\text{sat}} = \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Wb}}{\text{A} \cdot \text{m}}\right)\left(3.15 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}\right)$$

$$B_{\text{sat}} = 3.96 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 3.96 \text{ teslas}$$

Esto es casi dos veces más que el valor de 2.1 teslas observado experimentalmente. Si se invierten los cálculos, se puede demostrar que cada átomo de hierro contribuye con sólo alrededor de 2.1 magnetones de Bohr y no con 4. Esta es la diferencia entre el comportamiento de átomos individuales y su comportamiento en un cristal sólido. Se puede demostrar que, en el caso del hierro, la diferencia se debe al momento orbital de los electrones $3d$ que está siendo anulado en el cristal.

20-4 Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos

Como ya se mencionó, no existe un material "no magnético". Todos los materiales responden a los campos magnéticos. Cuando se aplica un campo magnético a un material, se observan varios tipos de comportamiento (figura 20-3).

Comportamiento diamagnético

Un campo magnético que actúa sobre cualquier átomo induce un dipolo magnético para todo el átomo, al influir en el campo magnético provocado por los electrones de sus órbitas. Estos dipolos se oponen al campo magnético, haciendo que la magnetización sea menor de cero. Este comportamiento, llamado **diamagnetismo**, brinda una permeabilidad relativa de unos 0.99995 (o susceptibilidad negativa de alrededor de -10^{-6}; observe el signo negativo). Materiales como el cobre, la plata, el silicio, el oro y la alúmina son diamagnéticos a temperatura ambiente. Los superconductores son diamagnetos perfectos ($\chi_m = -1$); pierden su superconductividad a temperaturas más altas o en presencia de un campo magnético. En un material diamagnético, la dirección de magnetización (M) es opuesta a la dirección del campo aplicado (H).

Paramagnetismo

Cuando los materiales tienen electrones impares, a cada átomo se le asocia un momento magnético neto debido al giro de los electrones. Al aplicarse un campo magnético, los dipolos quedan alineados con el campo, provocando una magnetización positiva. Como los dipolos no interaccionan, se requieren campos magnéticos extremadamente grandes para alinear todos los dipolos. Además, el efecto se pierde tan pronto como se retira el campo magnético. Este efecto, llamado **paramagnetismo**, se encuentra en metales como el aluminio, el titanio y las aleaciones de cobre. La susceptibilidad magnética (χ_m) de los materiales paramagnéticos es positiva y se encuentra entre 10^{-4} y 10^{-5}. Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con una temperatura superior a la temperatura de Curie también presentan un comportamiento paramagnético.

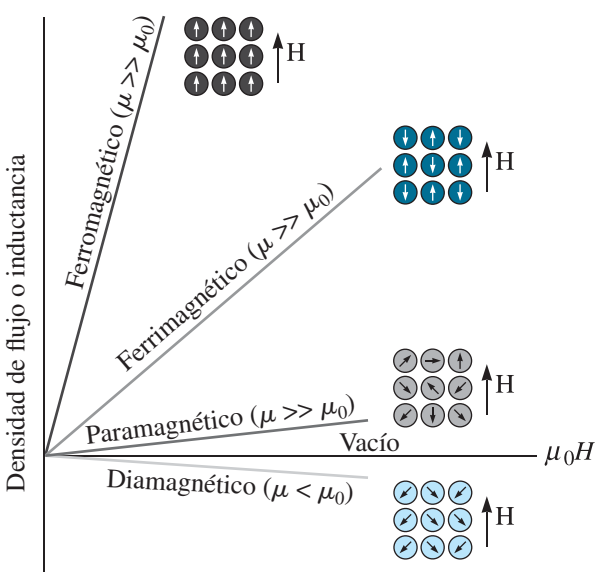


Figura 20-3 Efecto del material del núcleo sobre la densidad de flujo. En materiales diamagnéticos, el momento magnético se opone al campo. Para una misma intensidad de campo se presentan momentos cada vez más altos en los materiales paramagnéticos, ferrimagnéticos y ferromagnéticos.

Ferromagnetismo

El comportamiento ferromagnético es provocado por los niveles de energía que no están totalmente ocupados en el nivel 3*d* del hierro, el níquel y el cobalto. También se observa un comportamiento similar en otros materiales, incluyendo el gadolinio (Gd). En materiales ferromagnéticos, los dipolos impares permanentes quedan alineados con facilidad con el campo magnético impuesto, debido a la interacción de intercambio o al refuerzo mutuo de los dipolos. Se obtienen grandes magnetizaciones incluso para campos magnéticos pequeños, dando grandes susceptibilidades que se aproximan a 10^6. De modo similar a los ferroeléctricos, la susceptibilidad de los materiales ferromagnéticos depende de la intensidad del campo magnético aplicado. Esto es semejante al comportamiento mecánico de los elastómeros con el módulo de elasticidad dependiente del nivel de deformación. Arriba de la temperatura de Curie, los materiales ferromagnéticos se comportan como materiales paramagnéticos y su susceptibilidad está dada por la siguiente ecuación, conocida como ley de Curie-Weiss:

$$\chi_m = \frac{C}{(T - T_c)} \tag{20-10}$$

En esta ecuación, C es una constante que depende del material, T_c la temperatura de Curie y T la temperatura arriba de T_c. En esencia, la misma ecuación también describe el cambio en la permitividad dieléctrica de los ferroeléctricos arriba de la temperatura de Curie. En forma semejante a los ferroeléctricos, los materiales ferromagnéticos presentan la formación de dominios de ciclo de histéresis y dominios magnéticos. Estos materiales se estudiarán en la siguiente sección.

Antiferromagnetismo

En materiales como manganeso, cromo, MnO y NiO, los momentos magnéticos producidos en dipolos cercanos quedan alineados en oposición a algún otro en el campo magnético, aún si la fuerza de cada dipolo es muy alta. Este efecto se ilustra para el MnO en la figura 20-4. Estos materiales son **antiferromagnéticos** y tienen una magnetización igual a cero. La susceptibilidad magnética es positiva y pequeña. Además, el CoO y el $MnCl_2$ son ejemplos de materiales antiferromagnéticos.

Ferrimagnetismo

En materiales cerámicos, diferentes iones tienen distintos momentos magnéticos. En un campo magnético, los dipolos del catión *A* pueden alinearse con el campo, en tanto que los dipolos del catión *B* se oponen al campo. Pero debido a que la intensidad o el número de dipolos no son iguales, resulta una magnetización neta. Los materiales **ferrimagnéticos** pueden dar buena amplificación del campo impuesto. En una sección posterior se verá un grupo de materiales cerámicos llamados ferritas que presentan este comportamiento. Estos materiales muestran una susceptibilidad magnética dependiente del campo magnético que es similar a la de los materiales ferromagnéticos. También muestran un comportamiento de Curie-Weiss (a semejanza de los materiales ferromagnéticos) a temperaturas por encima de la temperatura de Curie. La mayoría de los materiales ferrimagnéticos son cerámicos y buenos aislantes de la electricidad. Entonces, en estos materiales, las pérdidas eléctricas (conocidas como pérdidas por corrientes parásitas) son mucho menores en comparación con aquellas de los materiales ferromagnéticos metálicos. Es por esto que las ferritas se usan en numerosas aplicaciones de alta frecuencia.

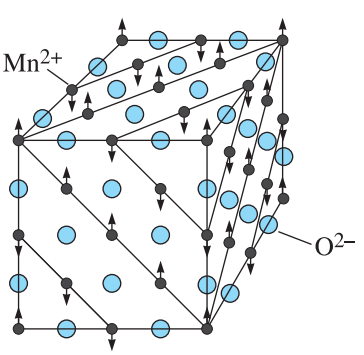


Figura 20-4 La estructura de cristal del MnO está formada por capas alternas de planos del tipo {111} de iones de oxígeno y manganeso. Los momentos magnéticos de los iones de manganeso en cada plano alterno (111) están alineados en oposición. En consecuencia, el MnO es antiferromagnético.

Superparamagnetismo Cuando el tamaño del grano de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos disminuye por debajo de cierto tamaño crítico, estos materiales se comportan como si fueran paramagnéticos. La energía del dipolo magnético de cada partícula se vuelve comparable a la energía térmica. Este pequeño momento magnético cambia su dirección de manera aleatoria (como resultado de la energía térmica). Es por eso que el material se comporta como si no tuviera un momento magnético neto. Esto se conoce como superparamagnetismo. Entonces, si se producen partículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) de un tamaño de 3 a 5 nm, se comportan como materiales superparamagnéticos. Estas partículas superparamagnéticas de óxido de hierro se usan para formar dispersiones en las fases portadoras acuosas u orgánicas, o para formar "imanes líquidos" o ferrofluidos. Las partículas en el fluido se mueven en respuesta a un gradiente en el campo magnético. Dado que las partículas forman una solución estable, toda la dispersión se mueve, y entonces el material se comporta como un imán líquido. Estos tipos de materiales se usan en los sellos de las unidades de disco duro de las computadoras y en los altavoces como medios de transferencia térmica (de enfriamiento). El imán permanente que se usa en un altoparlante mantiene los imanes líquidos en su lugar. Las partículas superparamagnéticas del óxido de hierro (Fe_3O_4) también pueden recubrirse con diferentes productos químicos y utilizarse para separar moléculas, proteínas y células del ADN de otras moléculas.

El siguiente ejemplo ilustra cómo se debe seleccionar un material para una aplicación determinada.

Ejemplo 20-2 *Diseño y selección de materiales para un solenoide*

Se desea construir una bobina solenoide que produzca una inductancia de por lo menos 2000 gauss cuando pase por el conductor una corriente de 10 mA. Debido a limitaciones de espacio, la bobina debe estar compuesta por 10 vueltas en una longitud de 1 cm. Seleccione un material para el núcleo de la bobina. Vea la tabla 20-4.

SOLUCIÓN

Primero se puede determinar el campo magnético H producido por la bobina. De la ecuación 20-2,

$$H = \frac{nI}{l} = \frac{(10)(0.01\,\text{A})}{0.01\,\text{m}} = 10\ \text{A/m}$$

$$H = (10\,\text{A/m})[4\pi \times 10^{-3}\ \text{oersted/(A/m)}] = 0.12566\,\text{oersted}$$

Si la inductancia B debe ser por lo menos de 2000 gauss, entonces la permeabilidad del material del núcleo debe ser

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2000}{0.12566} = 15{,}916\ \text{gauss/oersted}$$

La permeabilidad relativa del material del núcleo debe ser por lo menos

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{15{,}916}{1} = 15{,}916$$

Si se estudian los materiales magnéticos de la tabla 20-4, se encuentra que la aleación 4750 tiene una permeabilidad relativa máxima de 80,000 y podría ser una buena selección para el material del núcleo.

20-5 Estructura del dominio y el ciclo de histéresis

Desde un punto de vista fenomenológico, los materiales ferromagnéticos son similares a los ferroeléctricos. Un cristal de hierro o una pieza policristalina de acero al bajo carbono son ferromagnéticos, pero normalmente no muestran una magnetización neta. Dentro del monocristal o de la estructura policristalina de un material, ferromagnético o ferrimagnético, se produce una subestructura com-

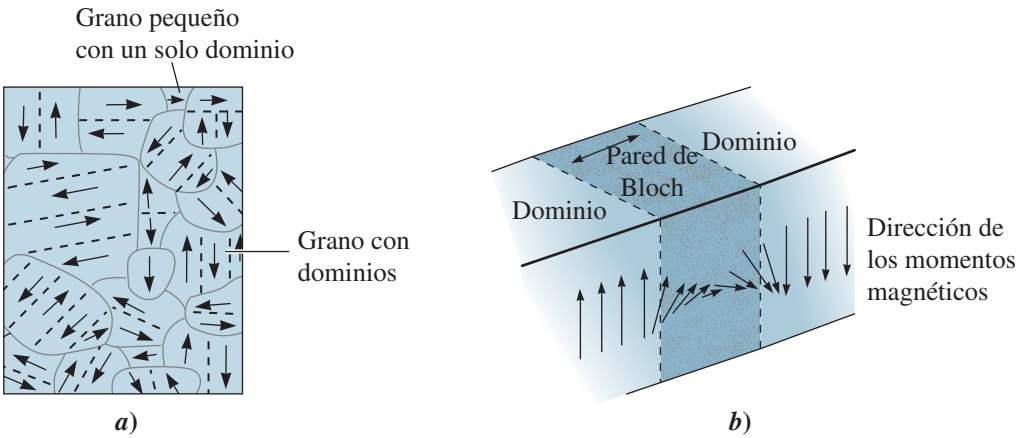


Figura 20-5 *a*) Esquema cualitativo de los dominios magnéticos en un material policristalino. Las líneas interrumpidas muestran la demarcación entre diferentes dominios magnéticos; las curvas muestran los límites de grano. *b*) Los momentos magnéticos cambian continuamente de dirección a través de los límites entre dominios.

puesta de dominios magnéticos, incluso en ausencia de un campo externo. Esto ocurre porque la presencia de numerosos dominios en el material, organizados de manera que la magnetización neta sea cero, reduce al mínimo la energía magnetoestática. Los **dominios** son regiones dentro del material en las que todos los dipolos están alineados en cierta dirección. En un material que nunca haya sido expuesto a un campo magnético, los dominios individuales tienen orientaciones al azar. Debido a esto, la magnetización neta en un material ferromagnético o ferrimagnético virgen es en su totalidad igual a cero [figura 20-5*a*)]. Al igual que en el caso de los materiales ferroeléctricos, la aplicación de un campo magnético (polarización) obligará a muchos de los dominios magnéticos a alinearse con la dirección del campo magnético.

Los límites, conocidos como **paredes de Bloch**, separan los dominios magnéticos individuales. Las paredes de Bloch son zonas angostas en las que la dirección del momento magnético cambia gradual y continuamente, desde la correspondiente a un dominio hasta la siguiente [figura 20-5*b*)]. Los dominios por lo general son muy pequeños, de unos 0.005 cm o menos, en tanto que las paredes de Bloch son de unos 100 nm de grueso.

Movimiento de dominios en un campo magnético

Cuando se impone un campo magnético sobre el material, los dominios que están prácticamente alineados con respecto al campo crecen a expensas de los dominios no alineados. Para que los dominios crezcan, las paredes de Bloch deben moverse; el campo proporciona la fuerza requerida para este movimiento. Inicialmente los dominios crecen con dificultad y se requieren grandes incrementos en el campo para producir apenas un poco de magnetización. Esto se presenta en la figura 20-6 en forma de una pendiente reducida, ya que es la permeabilidad inicial del material. Conforme aumenta la intensidad del campo, los dominios con orientación favorable crecen con mayor facilidad y, al mismo tiempo, se incrementa también la permeabilidad. Se puede definir una permeabilidad máxima como se muestra en la figura. En última instancia, los dominios con orientación desfavorable desaparecen y la rotación completa la alineación de los dominios en el campo. La **magnetización de saturación**, que se produce cuando todos los dominios están orientados en dirección al campo magnético, es la magnetización más alta que puede lograrse en el material. Bajo estas condiciones, la permeabilidad de estos materiales se vuelve realmente pequeña.

Efecto de eliminación del campo

Cuando el campo magnético se elimina, la resistencia que ofrecen las paredes de dominios impide que éstos vuelvan a crecer con orientaciones aleatorias. En consecuencia, gran parte de los dominios quedan orientados cerca de la dirección original del campo y una magnetización residual, que se conoce como **remanencia** (M_r), se encuentra presente en el material. El valor de B_r (por lo general en teslas), se conoce como retentividad del material magnético. El material se comporta como un imán permanente. La figura 20-7*a* muestra este

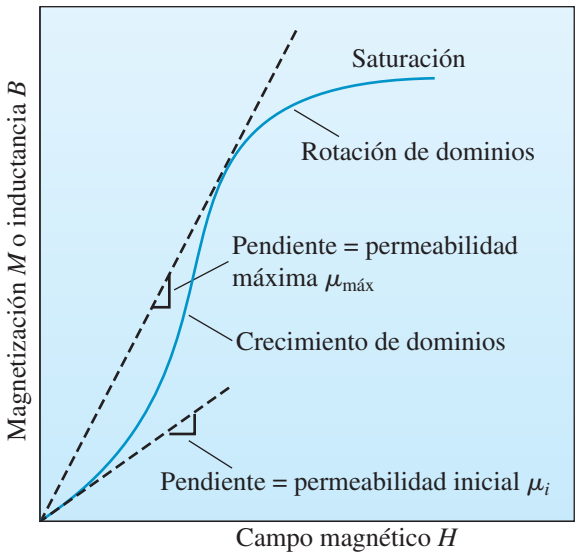


Figura 20-6 Cuando a un material magnético se le aplica un campo magnético por primera vez, la magnetización aumenta con lentitud y después más rápido a medida que los dominios comienzan a crecer. Posteriormente, la magnetización pierde rapidez, porque al final los dominios deben girar para alcanzar la saturación. Observe que los valores de la permeabilidad dependen de la magnitud de H. Por convención, la permeabilidad máxima será igual a la pendiente máxima de una tangente desde el origen hasta la curva B-H.

efecto en la curva de magnetización-campo. Observe que el ciclo M-H muestra saturación, no así el ciclo B-H. El campo magnético que se necesita para llevar la magnetización inducida a un valor cero se conoce como **coercitividad** del material. Esta es una propiedad sensible a la microestructura.

En los materiales magnéticos para grabación se usan partículas de Fe, γ-Fe_2O_3, Fe_3O_4, así como partículas de CrO_2 en forma de aguja. La forma alargada de las partículas magnéticas lleva a una coercitividad más alta (H_c). La dependencia de la coercitividad (H_c) sobre la forma de una partícula o de un grano se conoce como **anisotropía magnética de forma**. La coercitividad de los materiales para grabar debe ser más pequeña que la correspondiente a los imanes permanentes, en vista de que los datos escritos en un medio magnético de almacenamiento deben poder borrarse. Por otra parte, los valores de la coercitividad deben ser superiores a los correspondientes a los materiales magnéticos blandos, dado que se desea conservar la información almacenada. Este tipo de materiales se describe como magnéticamente semiduro.

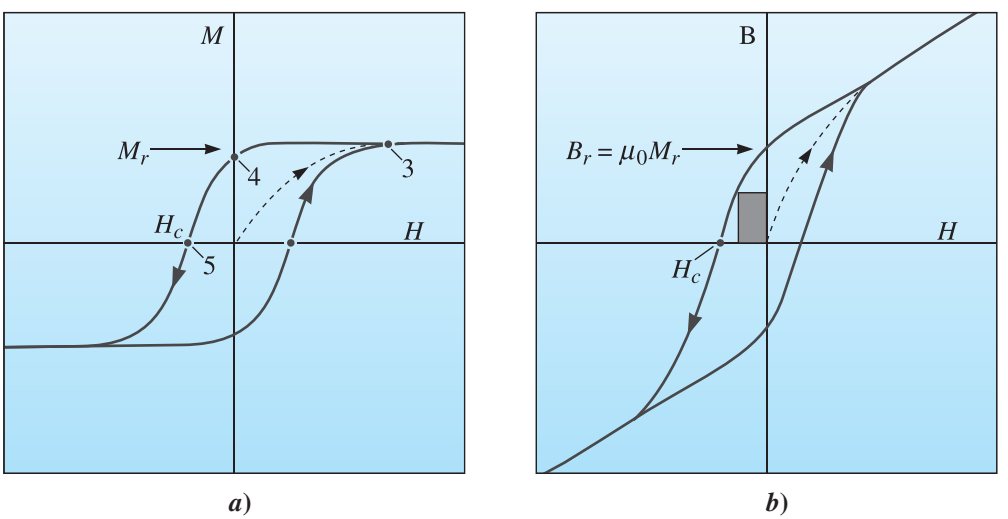


Figura 20-7 *a*) Ciclo de histéresis ferromagnético M-H que muestra el efecto del campo magnético sobre la inductancia o magnetización. Al alinearse los dipolos se alcanza la magnetización de saturación (punto 3), una remanencia (punto 4) y un campo coercitivo (punto 5). *b*) El ciclo B-H correspondiente. Observe el fin del ciclo B-H: el valor B no alcanza la saturación, puesto que $B = \mu_0 H + \mu_0 M$. (*Adaptado de* Permanent Magnetism*, por R. Skomski y J. M. D. Coey, editado por J. M. D. Coey y D. R. Tilley, Institute of Physics Publishing, 1999.*)

Efecto de invertir el campo

Si ahora se aplica un campo en la dirección inversa, los dominios crecen con una alineación en la dirección opuesta. Se requiere un campo coercitivo H_c para obligar a los dominios a adoptar una orientación aleatoria y que se cancelen entre sí. Con incrementos adicionales en la intensidad del campo, los dominios finalmente se alinearán hasta la saturación en la dirección opuesta.

Como el campo cambia continuamente de sentido, la relación entre la magnetización y el campo traza un **ciclo de histéresis**. Éste aparece en ambos trazos (*B*-*H* y *M*-*H*). El área contenida en el interior del ciclo de histéresis se relaciona con la energía consumida durante un ciclo del campo alternante. El área sombreada que aparece en la figura 20-7*b* representa el producto *B*-*H* y se conoce como la potencia del material magnético.

20-6 La temperatura de Curie

Cuando se incrementa la temperatura de un material ferromagnético o ferrimagnético, la energía térmica adicional incrementa la movilidad de los dominios, facilitándoles su alineación, pero también impidiéndoles que se conserven alineados cuando se elimina el campo. En consecuencia, tanto la magnetización de saturación como la remanencia y el campo coercitivo disminuyen todos a temperaturas altas (figura 20-8). Si la temperatura excede la **temperatura de Curie** (T_c), ya no se presenta un comportamiento ferromagnético o ferrimagnético. En vez de ello, el material se comporta como paramagnético. La temperatura de Curie (tabla 20-3), que depende del material, puede modificarse utilizando elementos de aleación. Los científicos franceses Marie y Pierre Curie (el único matrimonio que ha ganado un premio Nobel; Marie Curie en realidad ganó dos premios Nobel) hicieron investigaciones sobre los imanes, y la temperatura de Curie hace honor a sus nombres. De todas maneras, los dipolos pueden alinearse en un campo magnético por encima de la temperatura de Curie, pero quedan alineados de manera aleatoria cuando el campo magnético se elimina.

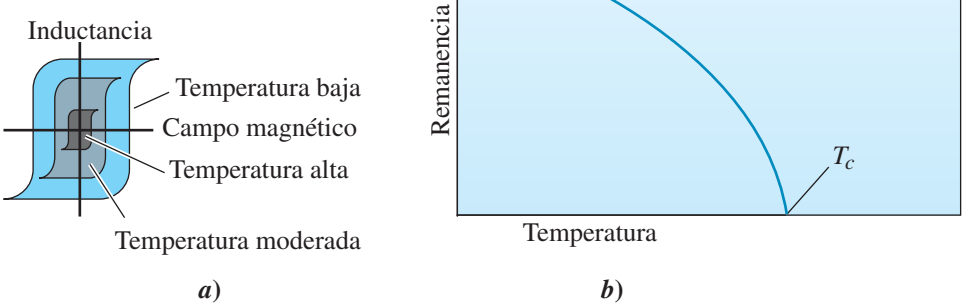


Figura 20-8 Efecto de la temperatura sobre *a*) el ciclo de histéresis y *b*) la remanencia. El comportamiento ferromagnético desaparece por encima de la temperatura de Curie.

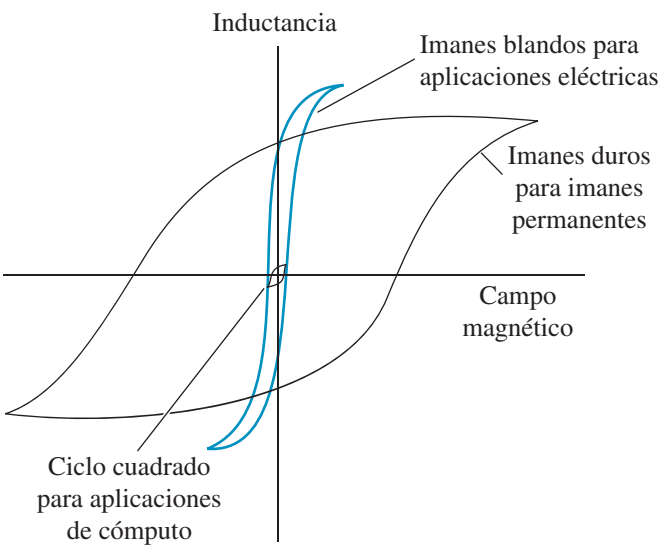
Tabla 20-3 Temperaturas de Curie para materiales seleccionados

Material	Temperatura de Curie (°C)	Material	Temperatura de Curie (°C)
Gadolinio	16	Hierro	771
$Nd_2Fe_{12}B$	312	Alnico 1	780
Níquel	358	Cunico	855
$BaO \cdot 6Fe_2O_3$	469	Alnico 5	900
Co_5Sm	747	Cobalto	1117

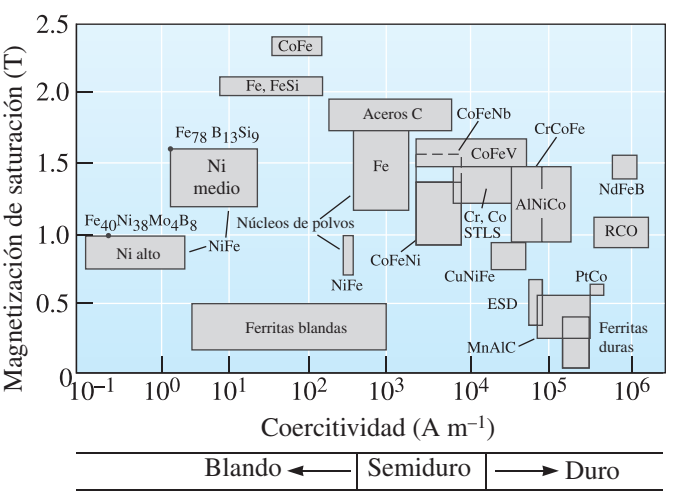
20-7 Aplicaciones de los materiales magnéticos

Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos se clasifican como magnéticamente blandos o magnéticamente duros, dependiendo de la forma de su ciclo de histéresis [figura 20-9*a*)]. En general, si el valor de la coercitividad es $>\sim 10^4$ A·m^{-1}, se considera al material como magnéticamente duro. Si los valores de la coercitividad son inferiores a 10^3 A · m^{-1}, se considera a los materiales como magnéticamente blandos. La figura 20-9*b* muestra la clasificación de distintos materiales magnéticos importantes desde un punto de vista comercial.

Observe que mientras que la coercitividad es una propiedad muy *sensible a la microestructura,* la magnetización de saturación es constante (es decir, no depende de la microestructura) para un material de una composición dada. Esto es semejante a la forma en que los materiales metálicos dependen, en gran medida, de la microestructura, no así el módulo de Young. Los valores de la



a)



b)

Figura 20-9 *a*) Comparación de los ciclos de histéresis para tres aplicaciones de materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos. (*Adaptado de "Magnetic Materials: An Overview, Basic Concepts, Magnetic Measurements, Magnetostrictive Materials", por G.Y. Chin et al. En R. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (eds.),* Encyclopedia of Advanced Materials, *vol. 1, Pergamon Press, 1994.*) *b*) Valores de magnetización de saturación y de coercitividad para diferentes materiales magnéticos.

coercitividad se ven afectados por numerosos factores, como la estructura de los límites de grano y la presencia de poros o de capas superficiales en las partículas, por ejemplo. La coercitividad de los monocristales depende en gran medida de la orientación cristalográfica. Existen ciertas direcciones a lo largo de las cuales es fácil alinear los dominios magnéticos. Hay otras direcciones a lo largo de las cuales la coercitividad es mucho más alta. La coercitividad de las partículas magnéticas también depende de su forma. Esta es la razón por la cual en los medios magnéticos de grabación se utilizan partículas aciculares y no esféricas. Este efecto también se emplea en los aceros Fe-Si, que están orientados en forma de granos o de textura, con la finalidad de reducir al mínimo las pérdidas de energía durante la operación de un transformador eléctrico.

En seguida se verán algunas aplicaciones para los materiales magnéticos.

Materiales magnéticos blandos

Los materiales ferromagnéticos se usan con frecuencia para mejorar la densidad del flujo magnético (B) producida cuando se hace pasar una corriente eléctrica por el material. Entonces se espera que el campo magnético realice trabajo. Entre sus aplicaciones se deben mencionar los núcleos para electroimanes, los motores eléctricos, los transformadores, los generadores y otros equipos eléctricos. Dado que estos dispositivos usan un campo alterno, el material del núcleo está sometido continuamente a los valores incluidos en el ciclo de histéresis. La tabla 20-4 muestra las propiedades de materiales magnéticos blandos, seleccionados. *Observe que, en estos materiales, el valor de la permeabilidad magnética relativa depende en gran medida de la intensidad del campo aplicado* (figura 20-6).

Estos materiales a menudo tienen las siguientes características:

1. Magnetización de alta saturación.
2. Alta permeabilidad.
3. Pequeño campo coercitivo.
4. Remanencia pequeña.
5. Ciclo de histéresis pequeño.

Tabla 20-4 Propiedades de materiales magnéticos blandos seleccionados

Nombre	Composición	Permeabilidad μ_r Inicial	Permeabilidad μ_r Máxima	Coercitividad H_c(A·m^{-1})	Retentividad B_r (T)	$B_{máx}$ (T)	Resistividad (μW·m)
Hierro en lingotes	99.8% Fe	150	5000	80	0.77	2.14	0.10
Acero al bajo carbono	99.5% Fe	200	4000	100		2.14	1.12
Hierro al silicio, sin orientación	Fe-3% Si	270	8000	60		2.01	0.47
Hierro al silicio, de grano orientado	Fe-3% Si	1400	50,000	7	1.20	2.01	0.50
4750 Aleación	Fe-48% Ni	11,000	80,000	2		1.55	0.48
Permalloy 4-79	Fe-4% Mo-79% Ni	40,000	200,000	1		0.80	0.58
Superalloy	Fe-5% Mo-80% Ni	80,000	450,000	0.4		0.78	0.65
Permendur 2V	Fe-2% V-49% Co	800	450,000	0.4		0.78	0.65
Supermendur	Fe-2% V-49% Co		100,000	16	2.00	2.30	0.40
Metglas[a] 2650SC	$Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$		300,000	3	1.46	1.61	1.35
Metglas[a] 2650S-2	$Be_{78}B_{13}S_9$		600,000	2	1.35	1.56	1.37
Ferrita MnZn	H5C2[b]	10,000		7	0.09	0.40	1.5×10^5
Ferrita MnZn	H5E[b]	18,000		3	0.12	0.44	5×10^4
Ferrita NiZn	K5[b]	290		80	0.25	0.33	2×10^{12}

[a] *Marca registrada de Allied Corporation.*
[b] *Código de ferrita TDK.*
(Adaptada de "Magnetic Materials: An Overview, Basic Concepts, Magnetic Measurements, Magnetostrictive Materials", por G.Y. Chin et al. En R. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (eds.), Encyclopedia of Advanced Materials, vol. 1, Pergamon Press, 1994.)

6. Respuesta rápida a campos magnéticos de alta frecuencia.
7. Resistividad eléctrica alta.

Una magnetización de saturación alta permite que el material realice trabajo, en tanto que una permeabilidad alta hace posible la obtención de la magnetización de saturación con campos magnéticos impuestos de valor reducido. Un campo coercitivo pequeño también indica que los dominios se pueden reorientar utilizando campos magnéticos reducidos. Es deseable tener una pequeña remanencia, de manera que cuando el campo externo se elimine prácticamente no quede nada de remanencia. Estas características también conducen a un ciclo de histéresis pequeño y, por lo tanto, a minimizar las pérdidas de energía durante la operación.

Si la frecuencia del campo aplicado es tan alta que los dominios no tienen tiempo para realinearse en cada ciclo, el dispositivo posiblemente se calentará debido a la fricción dipolar. Además, las frecuencias más altas producen de forma natural más calentamiento, debido a que el material pasa con mayor frecuencia a través del ciclo de histéresis, perdiendo más energía en cada ciclo. Para aplicaciones de alta frecuencia, los materiales deben permitir que los dipolos queden alineados con rapidez excepcionalmente alta.

También es posible perder energía por calentamiento si se producen corrientes parásitas. Durante la operación se pueden inducir corrientes eléctricas en el material magnético. Estas corrientes producen pérdidas de potencia y calentamiento en joules, es decir, I^2R. Las pérdidas por corrientes parásitas son particularmente severas cuando el material opera a frecuencias altas. Si la resistividad eléctrica es alta, estas corrientes parásitas se pueden limitar a un valor mínimo. Los imanes blandos fabricados con materiales cerámicos ferrimagnéticos tienen una alta resistividad, por lo que es menos probable que se calienten en comparación con los materiales ferromagnéticos metálicos. En tiempos recientes, una clase de materiales inteligentes conocidos como fluidos magnetorheológicos, o MR, se ha utilizado en varias aplicaciones relacionadas con el control de vibraciones, por ejemplo el sistema MagneRide^{MR} de Delphi. Estos materiales son como pinturas magnéticas y es posible que absorban energía de choques y vibraciones al activar un campo magnético. La rigidización de los fluidos MR es controlable y reversible. Algunos modelos de Cadillac y Corvette están equipados con una suspensión basada en estos materiales inteligentes.

Materiales para almacenamiento de datos

Los materiales magnéticos se usan para el almacenamiento de datos. La memoria se almacena magnetizando un material en cierta dirección. Por ejemplo, si el polo "norte" está activo, el bit de información almacenado es igual a 1. Si el polo "norte" no está activo, entonces lo que se almacena es un 0.

Para esta aplicación son preferibles los materiales con un ciclo de histéresis cuadrado, una remanencia baja, una magnetización por saturación también baja y un campo coercitivo reducido. Las ferritas duras basadas en Ba, CrO_2, partículas aciculares de hierro y γ-Fe_2O_3 satisfacen estos requisitos. La cinta magnética de las tarjetas de crédito y las tarjetas de las máquinas de los bancos, así como muchos audiocasetes, se fabrican utilizando partículas de γ-Fe_2O_3 o de Fe_3O_4. El ciclo cuadrado asegura que un bit de información que se coloque en el material mediante un campo magnético quede almacenado; es necesario un cambio abrupto y grande en la magnetización para eliminar la información del ferroimán. Además, la magnetización producida por campos externos reducidos mantiene reducidos el campo coercitivo (H_c), la magnetización por saturación y la remanencia (B_r).

Los valores B_r y H_c correspondientes a algunos materiales magnéticos comunes para grabación aparecen en la tabla 20-5.

Se han desarrollado muchas nuevas aleaciones con base en Co-Pt-Ta-Cr para la fabricación de discos duros para computadora, los cuales se fabrican utilizando películas delgadas pulverizadas de otros materiales. Como ya se explicó en capítulos anteriores, numerosas aleaciones se están perfeccionando, como las basadas en Fe-Pt y Fe-Pd nanoestructurados, para aplicaciones de almacenamiento de datos. En tiempos recientes ha evolucionado una tecnología conocida como *espintrónica* (*electrónica basada en el giro del electrón*). En ella la idea principal es aprovechar el giro de los electrones como una nueva forma de afectar el flujo de la corriente eléctrica (conocida como corriente polarizada por el giro) para la fabricación de dispositivos como los transistores de efecto de campo (TEC). También se está considerando la utilización del giro de los electrones (hacia arriba o hacia abajo) como una forma de almacenar información. Un ejemplo con mucho éxito de un dispositivo práctico basado en la espintrónica es un sensor gigante de magnetorresistencia (SGM) que se usa para leer información de discos duros en computadoras.

Tabla 20-5 Propiedades de materiales comunes en forma de polvos para grabación magnética

	Longitud de partícula (μm)	Proporción dimensional	Magnetización B_r		Coercitividad H_c		Área superficial (m^2/g)	Temperatura de Curie T_c (°C)
			(Wb/m^2)	(emu/cm^3)	(kA/m)	(Oe)		
γ-Fe_2O_3	0.20	5:1	0.44	350	22–34	420	15–30	600
Co-γ-Fe_2O_3	0.20	6:1	0.48	380	30–75	940	20–35	700
CrO_2	0.20	10:1	0.50	400	30–75	950	18–55	125
Fe	0.15	10:1	1.40[a]	1100[a]	56–176	2200	20–60	770
Ferrita de bario	0.05	0.02 μm de grosor	0.40	320	56–240	3000	20–25	350

[a] *Para partículas recubiertas estables, use sólo de 50 a 80% de estos valores, debido al menor volumen de partículas magnéticas. (Adaptado de* The Complete Handbook of Magnetic Recording, Fourth Edition, *por F. Jorgensen, The McGraw-Hill Companies, 1996).*

Imanes permanentes

Por último, los materiales magnéticos se usan para fabricar imanes permanentes de gran potencia (tabla 20-6). Los imanes permanentes poderosos, que a veces se denominan imanes duros, requieren lo siguiente:

1. Alta remanencia (dominios estables).
2. Alta permeabilidad.
3. Alto campo coercitivo.
4. Ciclo de histéresis grande.
5. Alta potencia (o producto BH).

El *récord* para cualquier producto de energía se obtiene para los imanes $Nd_2Fe_{14}B$ con una potencia de $\sim$445 $kJ \cdot m^{-3}$ [$\sim$56 mega-gauss-oersteds (MGOe)]. Estos imanes se construyen en forma de polvo mediante la solidificación rápida de una aleación fundida. Estos polvos se enlazan en una matriz polimérica o se comprimen en caliente para producir materiales voluminosos. El producto de la energía se incrementa cuando el imán sinterizado se "orienta" o se polariza. Algunos factores limitantes para el uso de estos materiales extraordinarios son la resistencia a la corrosión, la fragilidad y una temperatura de Curie relativamente baja, de $\sim$312°C.

La **potencia** del imán se relaciona con el tamaño del ciclo de histéresis, es decir, el producto máximo de B y H. La superficie del rectángulo de mayor tamaño que se puede inscribir en el segundo o en el cuarto cuadrante de la curva B-H se relaciona con la energía necesaria para desmagnetizar el imán [figuras 20-10*a*) y 20-10*b*)]. Para que el producto resulte grande, deberán ser grandes tanto la remanencia como el campo coercitivo.

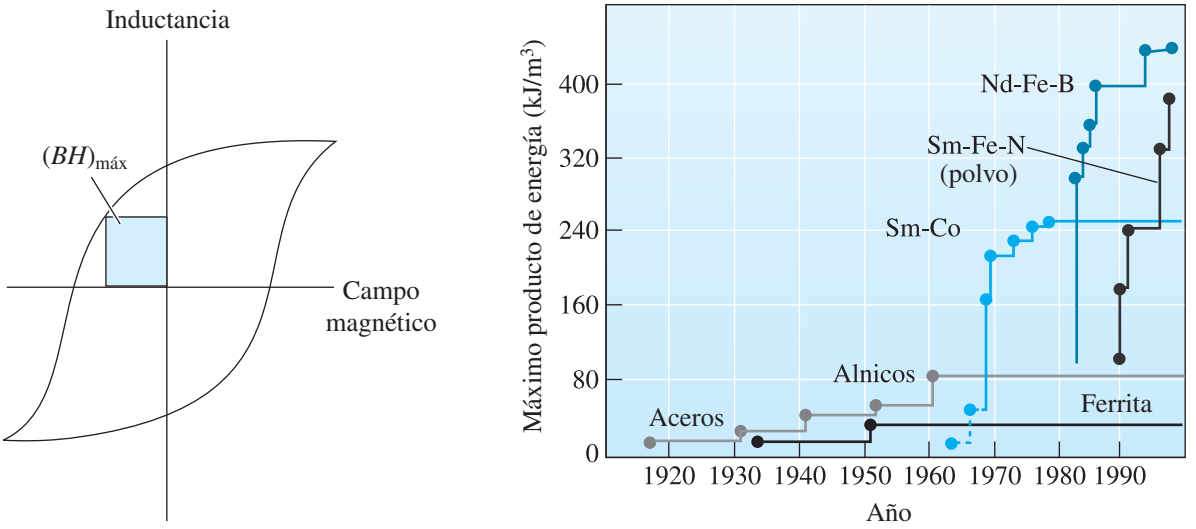
En numerosas aplicaciones es necesario calcular el poder elevador de un imán permanente. La fuerza magnética obtenible usando un imán permanente está dada por

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2} \tag{20-11}$$

Tabla 20-6 Propiedades de algunos materiales magnéticos duros, o permanentes

Material	Nombre común	$\mu_0 M_r$ (T)	$\mu_0 H_c$ (T)	$(BH)_{máx}$ ($kJ \cdot m^{-3}$)	T_c (°C)
Fe-Co	Co-steel	1.07	0.02	6	887
Fe-Co-Al-Ni	Alnico-5	1.05	0.06	44	880
$BaFe_{12}O_{19}$	Ferrita	0.42	0.31	34	469
$SmCo_5$	Sm-Co	0.87	0.80	144	723
$Nd_2Fe_{14}B$	Nd-Fe-B	1.23	1.21	290–445	312

(Adaptada de Permanent Magnetism, *por R. Skomski y J. M. D. Coey, p. 23, tabla 1.2. Editada por J. M. D. Coey y D.R. Tilley, Institute of Physics Publishing, 1999).*



a) *b*)

Figura 20-10 *a*) El rectángulo más grande trazado en el segundo o cuarto cuadrante de la curva *B-H* da el máximo producto *BH*. $(BH)_{máx}$ está relacionado con la potencia, o energía, necesaria para desmagnetizar el imán permanente. *b*) Desarrollo de materiales para imanes permanentes. El máximo producto de energía se muestra en el eje vertical. (*Adaptada de* Permanent Magnetism, *por R. Skomski y J. M. D. Coey, editado por J. M. D. Coey y D. R. Tilley, Institute of Physics Publishing, 1999.*)

En esta ecuación, A es el área de sección transversal, M la magnetización y μ_0 la permeabilidad magnética del espacio libre.

Uno de los ejemplos de mayor éxito de las aportaciones hechas por científicos de materiales e ingenieros en relación con este campo de actividad es el perfeccionamiento de imanes permanentes poderosos de tierras raras. El avance alcanzado en el desarrollo de imanes permanentes poderosos se ilustra en la figura 20-10*b*). Los imanes permanentes se usan en numerosas aplicaciones, incluyendo altoparlantes, motores, generadores, imanes de sujeción, separación de minerales y cojinetes. En general, ofrecen un campo magnético no uniforme, pero es posible emplear configuraciones geométricas conocidas como conjuntos de Halbach para producir campos magnéticos relativamente uniformes. El siguiente ejemplo ilustra aplicaciones de algunos de estos conceptos relacionados con materiales magnéticos permanentes.

Ejemplo 20-3 *Producto de energía para imanes permanentes*

Determine la potencia, o producto *BH*, para el material magnético con las propiedades que se ilustran en la figura 20-11.

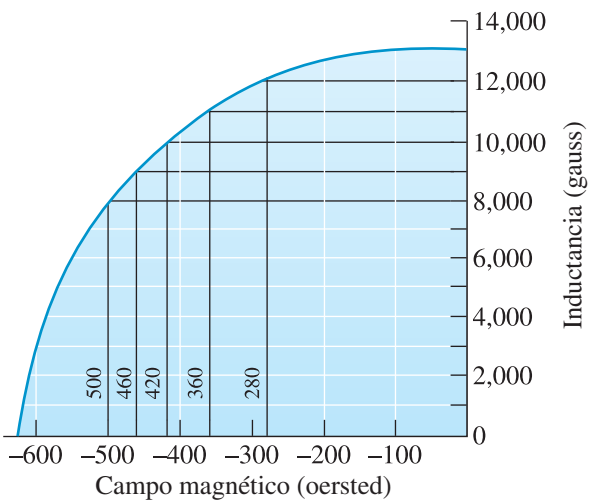


Figura 20-11 Cuarto cuadrante de la curva *B-H* para un material magnético permanente (para el ejemplo 20-3).

SOLUCIÓN

Se han trazado varios rectángulos en el cuarto cuadrante de la curva *B-H*. El producto *B-H* en cada uno es

$BH_1 = (12{,}000)(280) = 3.4 \times 10^6$ gauss · oersted

$BH_2 = (11{,}000)(360) = 4.0 \times 10^6$ gauss · oersted

$BH_3 = (10{,}000)(420) = 4.2 \times 10^6$ gauss · oersted = máximo

$BH_4 = (9{,}000)(460) = 4.1 \times 10^6$ gauss · oersted

$BH_5 = (8{,}000)(500) = 4.0 \times 10^6$ gauss · oersted

Por lo tanto, la potencia es aproximadamente 4.2×10^6 gauss · oersted.

Ejemplo 20-4 *Diseño y selección de materiales magnéticos*

Seleccione un material magnético apropiado para las siguientes aplicaciones: un motor eléctrico de alta eficiencia, un dispositivo magnético para mantener cerradas las puertas de las alacenas, un imán utilizado en un amperímetro o en un voltímetro y en imágenes de resonancia magnética.

SOLUCIÓN

Motor eléctrico de alta eficiencia: Para reducir al mínimo las pérdidas por histéresis, se podría usar un hierro al silicio de grano orientado, aprovechando su comportamiento anisótropo y su pequeño ciclo de histéresis. Como la aleación de hierro al silicio es conductora eléctricamente, se produciría una estructura laminada, con hojas delgadas de hierro al silicio emparedadas en un material dieléctrico no conductor. Serían recomendables hojas de un espesor menor de 0.5 mm.

Imán para puertas de alacenas: Los pestillos magnéticos que se usan para sujetar las puertas de alacenas deben ser imanes permanentes; sin embargo, el costo bajo es una característica de diseño más importante que una gran potencia. Se recomendaría un acero ferrítico económico o una ferrita de bajo costo.

Imanes para un amperímetro o un voltímetro: Para estas aplicaciones, las aleaciones de Alnico (aleaciones de hierro que también contienen Al, Ni y Co) son particularmente eficaces. Estas aleaciones son poco sensibles a los cambios de temperatura, lo que asegura lecturas precisas de corriente o de voltaje dentro de una escala determinada de temperaturas.

Imágenes de resonancia magnética: Una de las aplicaciones para las imágenes de resonancia magnética (IRM) es el diagnóstico médico. En este caso, se desea un imán muy poderoso. Un material magnético $Nd_2Fe_{12}B$, con un producto *BH* excepcionalmente alto, sería recomendable para esta aplicación. También es posible usar electroimanes muy poderosos utilizando superconductores.

El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se calcula la potencia elevadora de un imán permanente:

Ejemplo 20-5 *Potencia elevadora de un imán*

Calcule la fuerza en kN para una superficie de un metro cuadrado de un imán permanente cuya magnetización de saturación es de 1.61 teslas.

SOLUCIÓN

Como se observó, la fuerza de atracción de un imán permanente está dada por:

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2}$$

Se obtuvo el valor de $\mu_0 M = 1.61$ teslas. Se puede volver a presentar la ecuación que proporciona la fuerza debida a la acción de un imán permanente como sigue:

$$F = \frac{\mu_0 M^2 A}{2} = \frac{(\mu_0 M)^2 A}{2\mu_0}$$

$$\frac{F}{A} = \frac{(1.61\ \text{T})^2}{2\left(4\pi \times 10^{-7}\,\frac{\text{H}}{\text{m}}\right)} = 1.03\ \text{MN/m}^2$$

Observe que en este caso la fuerza será de 1.03 MN, dado que el área (A) quedó especificada igual a 1 m^2.

20-8 Materiales magnéticos metálicos y cerámicos

En seguida se verán los materiales cerámicos y las aleaciones comunes que se emplean en aplicaciones magnéticas y se analizará cómo se pueden mejorar sus propiedades y desempeño. Algunos materiales poliméricos han mostrado actividad magnética, pero sus temperaturas de Curie son demasiado bajas en comparación con las correspondientes de los materiales magnéticos metálicos y cerámicos para usarlas en aplicaciones de ingeniería.

Aleaciones magnéticas

El hierro, el níquel y el cobalto, que son ferromagnéticos, normalmente no se utilizan en forma pura en aplicaciones eléctricas, debido a sus conductividades eléctricas altas y sus ciclos de histéresis relativamente grandes, lo que conduce a pérdidas excesivas de energía. Son imanes permanentes relativamente malos; los dominios son fáciles de reorientar y tanto la remanencia como el producto BH son reducidos en comparación con los correspondientes a aleaciones más complejas. Se obtiene algún cambio en las propiedades magnéticas introduciendo defectos en la estructura. Las dislocaciones, los límites de grano, los límites entre fases múltiples y los defectos puntuales ayudan a fijar los límites de los dominios; de esta manera, los dominios se mantienen alineados cuando se elimina el campo magnetizador original.

Aleaciones de hierro-níquel Algunas aleaciones de hierro níquel, como el permalloy, tienen permeabilidades altas, lo que las hace útiles como imanes blandos. Un ejemplo de aplicación de estos imanes es el "cabezal" que graba o lee información en un disco de computadora (figura 20-12). Conforme el disco gira por debajo del cabezal, una corriente produce un campo magnético en éste. A su vez, el campo magnético del cabezal magnetiza una parte del disco. La dirección del campo producido en el cabezal determina la orientación de las partículas magnéticas incrustadas en el disco y, en consecuencia, se almacena información. Esta información puede recuperarse haciendo girar otra vez el

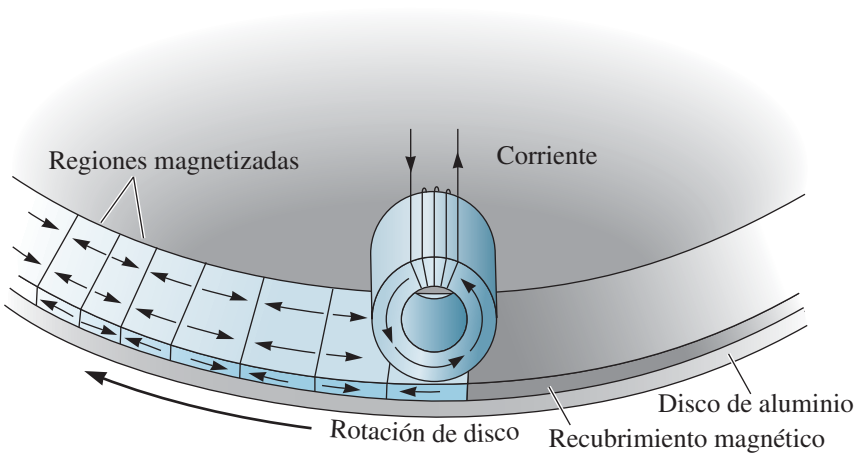


Figura 20-12 La información de un disco magnético se puede almacenar o recuperar con el uso de un cabezal electromagnético. Durante el almacenamiento, una corriente que pasa por el cabezal magnetiza dominios del disco; durante la recuperación, los dominios magnéticos del disco inducen una corriente eléctrica en el cabezal.

disco por debajo del cabezal. La región magnetizada en el disco induce una corriente en el cabezal; la dirección de la corriente depende de la dirección del campo magnético existente en el disco.

Hierro al silicio Se procesa en aceros de grano orientado. La introducción de 3 a 5% de Si en el hierro produce una aleación que, después de un procesamiento adecuado, resulta útil en aplicaciones eléctricas, como motores y generadores. Se aprovecha el comportamiento magnético anisótropo del hierro al silicio para obtener el mejor desempeño. Como resultado de la laminación y del recocido subsiguientes, se forma una textura de hoja en la que las direcciones ⟨100⟩ de cada grano quedan alineadas. Dado que el hierro al silicio se magnetiza con mayor facilidad en las direcciones ⟨100⟩, el campo requerido para darle magnetización de saturación es muy pequeño, y se observan tanto un pequeño ciclo de histéresis como una reducida remanencia (figura 20-13). Este tipo de anisotropía se conoce como **anisotropía magnetocristalina**.

Imanes compuestos Para reducir las pérdidas por corrientes parásitas, se usan imanes compuestos. Se laminan hojas delgadas de hierro al silicio intercalándolas con hojas de un material dieléctrico. Estas capas laminadas se ensamblan hasta obtener el espesor general deseado. El laminado incrementa la resistividad de los imanes compuestos y hace que éstos sean apropiados a frecuencias bajas e intermedias.

A frecuencias muy altas, las pérdidas tienen mayor importancia, ya que los dominios no tienen campo para realinearse. En este caso se puede usar un material compuesto que contenga partículas magnéticas en una matriz de polímero. Estas partículas, o dominios, giran fácilmente, al tiempo que se reducen al mínimo las pérdidas por corrientes parásitas a causa de la alta resistividad del polímero.

Materiales para almacenamiento de información Los materiales magnéticos para almacenamiento de información deben tener un ciclo cuadrado, así como un campo coercitivo reducido que permita una transmisión muy rápida de la información. Los discos duros para almacenamiento de datos en computadoras se fabrican de manera similar. En un disco duro, las partículas magnéticas están incrustadas en una película polimérica sobre un sustrato de aluminio plano. Debido a las características de la matriz polimérica y al pequeño tamaño de las partículas, los dominios pueden girar con rapidez en respuesta a un campo magnético. Estos materiales se resumen en la tabla 20-5.

Aleaciones metálicas complejas para imanes permanentes Se fabrican imanes permanentes de calidad mejorada produciendo granos de un tamaño tan pequeño que sólo un dominio está presente en cada grano. Ahora los límites entre dominios son límites de grano en lugar de paredes de Bloch. Los dominios pueden cambiar su orientación con sólo girar, lo que requiere más energía que el crecimiento del dominio. Para la producción de estos materiales magnéticos se utilizan dos técnicas: transformaciones de fase y metalurgia de polvos. El Alnico, una de las aleaciones metálicas complejas más comu-

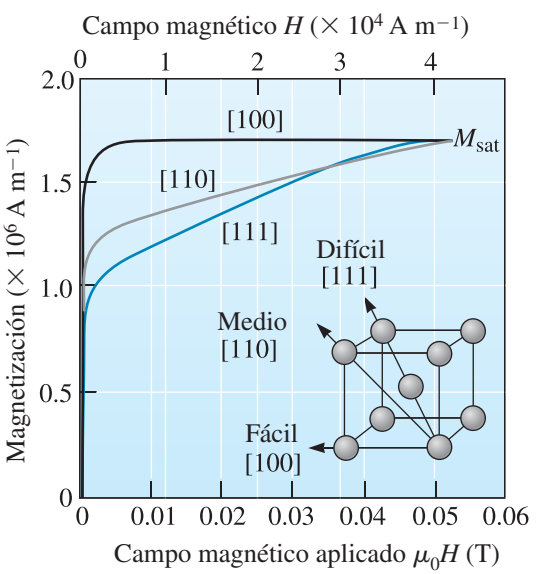


Figura 20-13 La curva de magnetización inicial para el hierro es altamente anisotrópica; la magnetización se facilita cuando las direcciones ‹100› están alineadas con el campo y se dificulta a lo largo de [111]. (*Fuente:* Principles of Electrical Engineering Materials and Devices, *por S. O. Kasap, Irwin, McGraw-Hill, 1997.*)

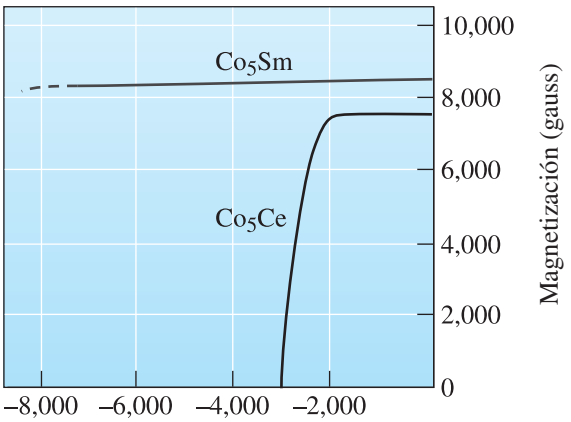


Figura 20-14 Curvas de desmagnetización para Co_5Sm y Co_5Ce, que representan una parte del ciclo de histéresis.

nes, tiene una estructura CCCu de una sola fase a temperaturas altas, pero cuando se deja enfriar lentamente por debajo de los 800°C se precipita una segunda fase CCCu rica en hierro y cobalto. Esta segunda fase es tan fina que cada partícula del precipitado es un dominio independiente, lo que produce remanencias, campos coercitivos y potencia muy altos. Con frecuencia se permite que las aleaciones se enfríen y se transformen, estando sometidas a un campo magnético, a fin de alinear los dominios conforme se vayan formando.

Una segunda técnica, la metalurgia de los polvos, se utiliza para la fabricación de aleaciones de metales de tierras raras, incluyendo el cobalto-samario. Una composición que produce Co_5Sm, un compuesto intermetálico, tiene un producto *BH* elevado (figura 20-14) debido a giros magnéticos no apareados en los electrones 4*f* del samario. El material intermetálico frágil se tritura y se muele para producir un polvo fino en el que cada partícula es un dominio. El polvo se compacta a continuación, mientras está en un campo magnético impuesto, con el fin de alinear los dominios en el polvo. Mediante una sinterización cuidadosa para evitar el crecimiento de las partículas, se obtiene un imán sólido de metalurgia de polvos. En el $Nd_2Fe_{14}B$, los dominios provienen de un compuesto intermetálico de grano fino, y un precipitado fino de HfB_2 impide el movimiento de las paredes de los dominios.

Materiales cerámicos ferrimagnéticos

Los materiales cerámicos magnéticos de uso común son las ferritas, que tienen una estructura cristalina en espinel (figura 20-15). Estas ferritas no tienen nada que ver con la *fase ferrítica* que se encuentra al estudiar el diagrama de fases Fe-C (capítulos 12 y 13). Las ferritas se utilizan en las comunicaciones inalámbricas y en la microelectrónica en aplicaciones como los inductores. Los polvos para ferritas se elaboran aplicando técnicas de procesamiento de materiales cerámicos.

Se puede entender el comportamiento de estos imanes cerámicos al observar la magnetita, Fe_3O_4. Ésta contiene dos iones diferentes de hierro, Fe^{2+} y Fe^{3+}, por lo que se podría reescribir su fórmula como La estructura cristalina de la magnetita, o espinel, está basada en una configuración CCCa de iones de oxígeno, donde los iones de hierro ocupan sitios intersticiales seleccionados. Aun cuando la celda unitaria del espinel en realidad contiene ocho de estas configuraciones CCCa, es necesario analizar sólo una de las subceldas CCCa:

1. Hay cuatro iones de oxígeno en las posiciones CCCa de la subcelda.
2. En cada borde y en el centro de la subcelda están presentes sitios octaédricos, mismos que están rodeados por seis iones oxígeno. Un ion Fe^{2+} y un ion Fe^{3+} ocupan los sitios octaédricos.
3. Los sitios tetraédricos tienen índices en la subcelda, de la forma (1/4, 1/4, 1/4). Un ion Fe^{3+} ocupa uno de los sitios tetraédricos.
4. Cuando se forman los iones Fe^{2+}, se eliminan los dos electrones 4*s* del hierro, pero todos los electrones 3*d* se quedan. Debido a que existen cuatro electrones no apareados en el nivel 3*d* del hierro, la fuerza magnética del dipolo Fe^{2+} es cuatro de magnetones de Bohr. Cuando se forma Fe^{3+}, los dos electrones 4*s* y uno de los electrones 3*d* son retirados. El ion Fe^{3+} tiene

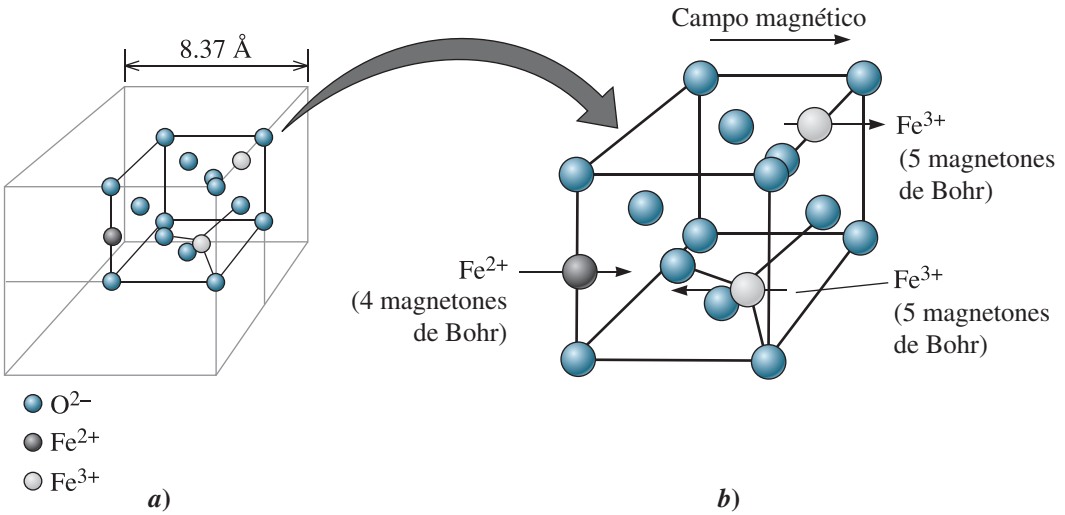


Figura 20-15 *a*) Estructura de la magnetita, Fe_3O_4. *b*) Subcelda de la magnetita. Los momentos magnéticos de los iones en los sitios octaédricos quedan alineados con el campo magnético, pero los momentos de los iones en los sitios tetraédricos se oponen al campo. Esta configuración iónica produce un momento magnético neto.

cinco electrones no apareados en el nivel 3*d* y, por tanto, tiene una fuerza de cinco magnetones de Bohr.

5. Los iones en los sitios tetraédricos de la magnetita quedan alineados de forma que sus momentos magnéticos se oponen al campo magnético aplicado, pero los iones de los sitios octaédricos refuerzan el campo [figura 20-15*b*)]. En consecuencia, el ion Fe^{3+} de un sitio tetraédrico neutraliza al ion Fe^{3+} del sitio octaédrico (el acoplamiento del ion Fe^{3+} es antiferromagnético), pero el ion Fe^{2+} del sitio octaédrico no encuentra oposición de ningún otro ion, lo que refuerza el campo magnético. El siguiente ejemplo muestra la forma de calcular la magnetización en el Fe_3O_4, que es una de las ferritas.

Ejemplo 20-6 *Magnetización en la magnetita (Fe_3O_4)*

Calcule el momento magnético total por centímetro cúbico en la magnetita. Calcule el valor de la densidad de flujo de saturación (B_{sat}) para este material. El parámetro de red es 8.37×10^{-8} cm.

SOLUCIÓN

En la subcelda [figura 20-15*b*)], el momento magnético total es igual a cuatro magnetones de Bohr, obtenido a partir del ion Fe^{2+}, en vista de que se cancelan entre sí los momentos magnéticos de los dos iones Fe^{3+} localizados en los sitios tetraédricos y octaédricos.

En toda la celda unitaria existen ocho subceldas, por lo que el momento magnético total es igual a 32 magnetones de Bohr por celda.

El tamaño de la celda unitaria, con un parámetro de red igual a 8.37×10^{-8} cm, es

$$V_{\text{celda}} = (8.37 \times 10^{-8})^3 = 5.86 \times 10^{-22}\ \text{cm}^3$$

El momento magnético por centímetro cúbico es igual a

$$\text{Momento total} = \frac{32\ \text{magnetones de Bohr / celda}}{5.864 \times 10^{-22}\ \text{cm}^3/\text{celda}} = 5.457 \times 10^{22}\ \text{magnetones/cm}^3$$

$$= (5.457 \times 10^{22})(9.274 \times 10^{-24}\ \text{A} \cdot \text{m}^2/\text{magnetón})$$

$$= 0.506\ \text{A} \cdot \text{m}^2/\text{cm}^3 = 5.06 \times 10^5\ \text{A} \cdot \text{m}^2/\text{m}^3 = 5.06 \times 10^5 \text{A/m}$$

Esta expresión representa la magnetización M a la saturación (M_{sat}). El valor de $B_{sat} \simeq \mu_0 M_{sat}$ será $[4\pi \times 10^{-7}\text{Wb/(A} \cdot \text{m)}](5.06\ \text{A/m}) = 0.64$ teslas.

Tabla 20-7 Momentos magnéticos de iones en la estructura de espinel

Ion	Magnetones de Bohr	Ion	Magnetones de Bohr
Fe^{3+}	5	Co^{2+}	3
Mn^{2+}	5	Ni^{2+}	2
Fe^{2+}	4	Cu^{2+}	1
		Zn^{2+}	0

Cuando se reemplazan iones con iones Fe^{2+} en la estructura de espinel, es posible cambiar el comportamiento magnético. Iones que pueden no producir ferromagnetismo en un metal puro pueden contribuir al ferrimagnetismo en los espineles, como se observa en los momentos magnéticos de la tabla 20-7. Cuando el ion Fe^{2+} es reemplazado con mezclas diversas de manganeso, zinc, níquel y cobre, se obtienen imanes blandos. Los iones de níquel y de manganeso tienen momentos magnéticos que cancelan parcialmente el efecto de los dos iones de hierro, pero se obtiene un comportamiento neto ferrimagnético, con un ciclo pequeño de histéresis. La alta resistividad eléctrica de estos compuestos cerámicos ayuda a reducir al mínimo las corrientes parásitas, permitiendo la operación de estos materiales a altas frecuencias. Las ferritas que se utilizan en aplicaciones de cómputo pueden contener adiciones de manganeso, magnesio o cobalto para producir un comportamiento cuadrado en el ciclo de histéresis.

Otro grupo de imanes cerámicos suaves se basa en los granates, incluyendo el granate de itrio hierro, $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG). Estos óxidos complejos, que se pueden modificar al sustituir el hierro con aluminio o cromo, o al reemplazar el itrio con lantano o praseodimio, se comportan de manera muy semejante a las ferritas. Otro granate, basado en el gadolinio y el galio, puede producirse en forma de película delgada. Se pueden producir dominios magnéticos minúsculos en esta película de granate; estos dominios, o *burbujas magnéticas,* pueden servir como unidades de almacenamiento para computadoras. Una vez magnetizados, los dominios no pierden su memoria en caso de una pérdida repentina de energía.

Los imanes cerámicos duros que se usan como imanes permanentes incluyen otra familia de óxidos complejos, las ferritas hexagonales. Entre éstas se encuentran el $SrFe_{12}O_{19}$ y el $BaFe_{12}O_{19}$.

El siguiente ejemplo muestra la selección de un imán cerámico.

Ejemplo 20-7 *Diseño y selección de materiales para un imán cerámico*

Diseñe un imán cúbico de ferrita que tenga un momento magnético total por metro cúbico de 50×10^5 A/m.

SOLUCIÓN

En el ejemplo 20-6 se vio que el momento magnético por metro cúbico para el Fe_3O_4 es igual a 5.06×10^5 A/m. Si se desea obtener una magnetización de saturación más alta, se deben reemplazar los iones Fe^{2+} con iones que tengan más magnetones de Bohr por átomo. Una de las posibilidades es el Mn_{2+} (tabla 20-7), que tiene cinco magnetones de Bohr.

Suponga que la adición de dos iones Mn no afecta de manera apreciable el tamaño de la celda unitaria, se encuentra, a partir del ejemplo 20-6, que

$$V_{\text{celda}} = 5.864 \times 10^{-22}\,\text{cm}^3 = 5.864 \times 10^{-28}\,\text{m}^3$$

Sea x la fracción de iones Mn^{2+} que han reemplazado a los iones Fe^{2+}, que ahora se han reducido a $1 - x$. Entonces, el momento magnético total es

Momento total

$$= \frac{(8\text{ subceldas})[(x)(5\text{ magnetones}) + (1-x)(4\text{ magnetones})](9.274 \times 10^{-24}\,\text{A} \cdot \text{m}^2)}{5.864 \times 10^{-28}\,\text{m}^3}$$

$$= \frac{(8)(5x + 4 - 4x)(9.274 \times 10^{-24})}{5.864 \times 10^{-28}} = 5.50 \times 10^5$$

$$x = 0.347$$

Por lo tanto, es necesario sustituir 34.7 en el porcentaje de átomos de los iones Fe^{2+} con iones Mn^{2+} para obtener la magnetización deseada.

Magnetoestricción Ciertos materiales se pueden deformar cuando cambia su estado magnético. Este efecto se utiliza en los activadores. El efecto magnetorrestrictivo se puede observar modificando el campo magnético o modificando la temperatura. Hierro, níquel, Fe_3O_4, $TbFe_2$, DyFe y $SmFe_2$ son ejemplos de algunos materiales que muestran este efecto. El Terfenol-D, que recibe su nombre en función de sus elementos constitutivos: terbio (Tb), hierro (Fe) y disprosio (Dy), así como de su inventor, el Naval Ordinance Laboratory (NOL), es uno de los materiales magnetoestrictivos más conocidos. Su composición es $\sim Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ ($0.27 < x < 0.30$, $1.9 < y < 2$). Este fenómeno de magnetoestricción es análogo a la electrorrestricción. En fechas recientes se han perfeccionado algunas aleaciones ferromagnéticas que también muestran magnetoestricción.

Resumen

- Todos los materiales interaccionan con los campos magnéticos. Las propiedades magnéticas de los materiales están relacionadas con la interacción de los dipolos magnéticos y un campo magnético. Los dipolos magnéticos se originan con la estructura electrónica del átomo, generando varios tipos de comportamientos.
- Los materiales magnéticos han hecho posible el surgimiento de numerosas tecnologías, desde imanes superconductores de alta intensidad para imágenes de resonancia magnética, materiales semiduros que se usan en el almacenamiento de datos, imanes permanentes utilizados en altoparlantes, motores y generadores, hasta materiales superparamagnéticos que se emplean para elaborar ferrofluidos y para la separación magnética de moléculas y celdas del ADN.
- En los materiales diamagnéticos, los dipolos magnéticos se oponen al campo magnético aplicado.
- En los materiales paramagnéticos, los dipolos magnéticos refuerzan ligeramente el campo magnético aplicado, incrementando la magnetización o la inductancia netas.
- Los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos son no lineales desde el punto de vista magnético; su permeabilidad depende en gran medida del campo magnético aplicado. En materiales ferromagnéticos (como hierro, níquel y cobalto), los dipolos magnéticos refuerzan poderosamente el campo magnético aplicado, produciendo una magnetización o una inductancia neta importante. En materiales ferrimagnéticos, algunos dipolos magnéticos refuerzan el campo, en tanto que otros se oponen al mismo, pero ocurre un incremento neto en la magnetización o en la inductancia. La magnetización puede conservarse, incluso después de eliminar el campo magnético. Si la temperatura se incrementa por encima de la de Curie, desaparece el comportamiento ferromagnético o ferrimagnético.
- La estructura de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos contiene dominios dentro de los cuales todos los dipolos magnéticos están alineados. Cuando se aplica un campo magnético, los dipolos quedan alineados con el campo, incrementando al máximo su valor de magnetización o de saturación. Al eliminar el campo magnético, es posible que permanezca parte del alineamiento en los dominios, generando una magnetización remanente.
- En el caso de los materiales magnéticos blandos, existe poca remanencia y sólo se requiere de un campo coercitivo pequeño para eliminar cualquier alineación existente en los dominios; debido a esto, se consume poca energía en la reorientación de los dominios cuando se aplica un campo magnético alternante.

- En el caso de los materiales magnéticos duros, o permanentes, los dominios se conservan alineados casi por completo al eliminar el campo magnético, se requieren campos coercitivos de gran magnitud para orientar los dominios de manera aleatoria y se observa un ciclo de histéresis grande. Este estado proporciona una alta potencia al imán.
- La magnetorrestricción es el desarrollo de una deformación en respuesta a un campo magnético aplicado o a un cambio en la temperatura que induzca una transformación magnética. Se han desarrollado materiales magnetoestrictivos del tipo Terfenol para aplicaciones en activadores.

Glosario

Anisotropía de forma Dependencia de la coercitividad sobre la forma de las partículas magnéticas.

Anisotropía magnetocristalina En monocristales, la coercitividad depende de la dirección cristalográfica, creando ejes fáciles y ejes difíciles de magnetización.

Antiferromagnetismo Distribución de los momentos magnéticos tal que los momentos magnéticos de los átomos o de los iones se cancelan, generando una magnetización neta igual a cero.

Ciclo de histéresis Ciclo que traza la magnetización en un material ferromagnético o ferrimagnético cuando el campo magnético es alternado.

Coercitividad Campo magnético necesario para forzar los dominios en una dirección opuesta a la orientación de la magnetización. Esta es una propiedad sensible a la microestructura.

Diamagnetismo Efecto provocado por el momento magnético debido al giro de los electrones en sus órbitas, el cual produce una ligera oposición al campo magnético impuesto. Todos los materiales exhiben este efecto relativamente débil.

Dominios Pequeñas regiones dentro de un material de monocristalino o policristalino en las que todas las direcciones de magnetización están alineadas.

Ferrimagnetismo Comportamiento magnético que resulta cuando los iones de un material tienen sus momentos magnéticos alineados en una distribución antiparalela tal que los momentos no se cancelan entre sí por completo, quedando una magnetización neta.

Ferromagnetismo Alineación de los momentos magnéticos de los átomos en la misma dirección, de modo que después de eliminar el campo magnético queda una magnetización neta.

Imán blando Material ferromagnético o ferrimagnético que tiene una coercitividad de $\leq 10^3\ \mathrm{A \cdot m^{-1}}$.

Imán duro Material ferromagnético o ferrimagnético que tiene una coercitividad $> 10^4\ \mathrm{A \cdot m^{-1}}$. Es lo mismo que un imán permanente.

Imán permanente Material magnético duro.

Magnetización El momento magnético total por unidad de volumen.

Magnetización de saturación Cuando todos los dipolos se han alineado con el campo, produciendo la magnetización máxima.

Magnetón de Bohr Intensidad del momento magnético de un electrón (μ_B) debida al giro de ese electrón.

Momento magnético Intensidad del campo magnético asociada con un dipolo magnético.

Paramagnetismo Alineamiento de los espines de los electrones al aplicar un campo magnético.

Paredes de Bloch Límites entre dominios magnéticos.

Permeabilidad magnética Relación entre la inductancia o magnetización y el campo magnético.

Potencia Intensidad de un imán permanente expresada por el producto máximo de la inductancia y el campo magnético.

Remanencia Polarización o magnetización que queda en un material después de que se haya retirado un campo magnético. La remanencia se debe al alineamiento permanente de los dipolos.

Superparamagnetismo En el régimen a nanoescala, materiales que son ferromagnéticos o ferrimagnéticos pero que se comportan de forma paramagnética (debido a sus granos o partículas de nanotamaño).

Susceptibilidad magnética Relación entre la magnetización y el campo aplicado.

Temperatura de Curie Temperatura por encima de la cual los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos se convierten en paramagnéticos.

Problemas

Sección 20-1 Clasificación de los materiales magnéticos

Sección 20-2 Dipolos magnéticos y momentos magnéticos

20-1 Cite cuatro aplicaciones de distintos materiales magnéticos.

20-2 Explique el siguiente enunciado: "Estrictamente hablando, no existe ningún material no magnético".

20-3 Normalmente se descarta el momento magnético del núcleo. ¿En qué aplicaciones es importante este momento magnético?

20-4 ¿Cuáles dos movimientos de los electrones son importantes para determinar las propiedades magnéticas de los materiales?

20-5 Explique por qué sólo un pequeño grupo de sólidos presenta un comportamiento ferromagnético o ferrimagnético.

20-6 Calcule y compare la magnetización máxima que se debe esperar del hierro, el níquel, el cobalto y el gadolinio. Hay siete electrones en el nivel $4f$ del gadolinio. Compare los valores calculados con los observados experimentalmente.

20-7 Calcule la masa de un electrón usando la masa del magnetón de Bohr y la constante de Planck.

Sección 20-3 Magnetización, permeabilidad y campo magnético

Sección 20-4 Materiales diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos

Sección 20-5 Estructura del dominio y el ciclo de histéresis

20-8 Defina los siguientes términos: inducción magnética, campo magnético, susceptibilidad magnética y permeabilidad magnética.

20-9 Defina los siguientes términos: materiales ferromagnéticos, ferrimagnéticos, diamagnéticos, paramagnéticos, superparamagnéticos y antiferromagnéticos.

20-10 ¿Qué es un material ferromagnético? ¿Qué es un material ferrimagnético? Explique y proporcione ejemplos de cada tipo de material.

20-11 ¿Cómo cambia la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con la temperatura cuando ésta es superior a la temperatura de Curie?

20-12 Deduzca la ecuación $\mu_r = 1 + \chi_m$ usando las ecuaciones de la 20-4 a la 20-7.

20-13 Una bobina solenoide de permalloy 4-79 debe producir una inductancia mínima de 1.5 Wb/m^2. Si la corriente máxima permitida es de 5 mA, ¿cuántas vueltas son necesarias en un alambre de 1 m de largo?

20-14 Se debe producir una aleación de níquel y cobalto para obtener una magnetización de 2×10^6 A/m. La estructura del cristal de la aleación es CCCa con un parámetro de red de 0.3544 nm. Determine el porcentaje atómico de cobalto necesario, suponiendo que no ocurre interacción alguna entre el níquel y el cobalto.

20-15 Estime la magnetización que se produciría en una aleación que contiene níquel y 70% de átomos de cobre, suponiendo que no ocurre interacción alguna.

20-16 Una aleación de Fe-80% Ni tiene una permeabilidad máxima de 300,000 cuando se obtiene una inductancia de 3500 gauss. La aleación se coloca en una bobina de 20 vueltas, de 2 cm de longitud. ¿Qué corriente debe fluir por los conductores de la bobina para obtener este campo?

20-17 Una aleación de Fe-49% Ni tiene una permeabilidad máxima de 64,000 cuando se le aplica un campo magnético de 0.125 oersteds. ¿Qué inductancia se obtiene y qué corriente se necesita para llegar a esta inductancia en una bobina de 200 espiras y 3 cm de longitud?

20-18 Trace un esquema de los ciclos B-H y M-H para un material ferromagnético común. ¿Cuál es la diferencia entre estos dos ciclos?

20-19 ¿Es constante la permeabilidad magnética de un material ferromagnético o ferrimagnético? Explique su respuesta.

20-20 Desde un punto de vista fenomenológico, ¿cuáles son las similitudes entre los elastómeros, los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos, y los ferroeléctricos?

20-21 ¿Cuáles son las principales diferencias entre los materiales ferromagnéticos y los ferrimagnéticos?

20-22 Compare las resistividades eléctricas de los metales ferromagnéticos y los cerámicos ferrimagnéticos.

20-23 ¿Por qué son importantes las pérdidas por corrientes parásitas en el diseño de materiales ferromagnéticos, pero son menos importantes en los materiales ferrimagnéticos?

20-24 ¿Qué elemento tiene la magnetización de saturación más alta? ¿Cuáles son las aleaciones con la más alta magnetización de saturación de entre todos los materiales?

20-25 ¿Qué material, entre todos los materiales magnéticos, tiene el producto de energía o potencia más alto?

20-26 ¿La coercitividad de un material es una propiedad sensible a la microestructura? ¿La remanencia es una propiedad sensible a la microestructura? Explique.

20-27 ¿La magnetización de saturación es una propiedad sensible a la microestructura? Explique.

20-28 ¿Puede un mismo material tener diferentes ciclos de histéresis? Explique.

20-29 Los siguientes datos describen el efecto del campo magnético en la inductancia de un acero al silicio. Calcule la permeabilidad inicial y la permeabilidad máxima del material.

H (A/m)	*B* (teslas)
0.00	0
20	0.08
40	0.30
60	0.65
80	0.85
100	0.95
150	1.10
250	1.25

20-30 Un material magnético tiene un campo coercitivo de 167 A/m, una magnetización de saturación de 0.616 teslas y una inductancia residual de 0.3 teslas. Trace el ciclo de histéresis del material.

20-31 Un material magnético tiene un campo coercitivo de 10.74 A/m, una magnetización de saturación de 2.158 teslas y una inductancia residual de 1.183 teslas. Trace el ciclo de histéresis del material.

20-32 Usando la figura 20-16, determine las siguientes propiedades del material magnético: remanencia, magnetización de saturación, campo coercitivo, permeabilidad inicial, permeabilidad máxima y potencia (producto *BH* máximo).

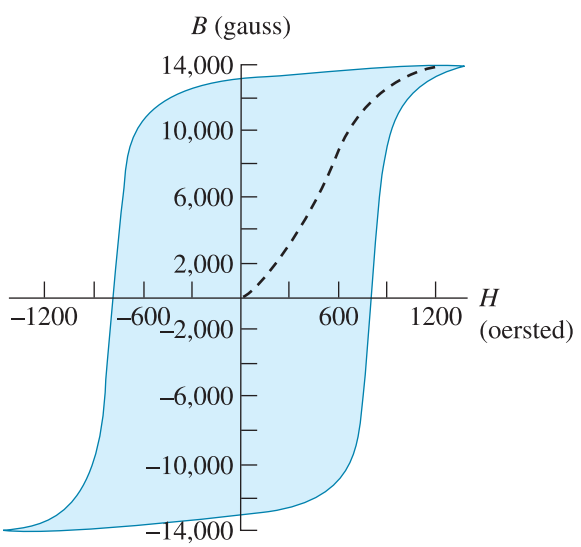


Figura 20-16 Curva de histéresis de un material magnético duro (para el problema 20-31).

20-33 Usando la figura 20-17, determine las siguientes propiedades del material magnético: remanencia, magnetización de saturación, campo coercitivo, permeabilidad inicial, permeabilidad máxima y potencia (producto *BH* máximo).

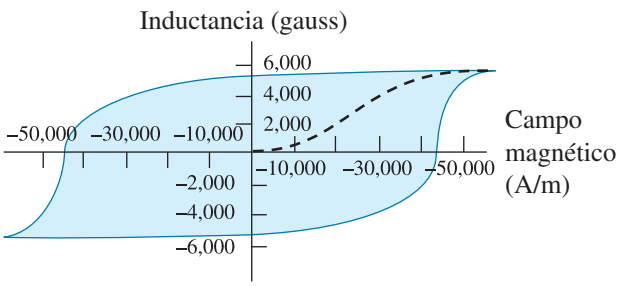


Figura 20-17 Curva de histéresis de un material magnético duro (para el problema 20-32).

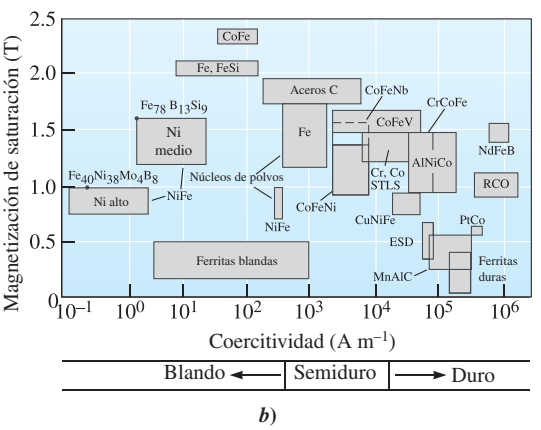
Sección 20-6 La temperatura de Curie

Sección 20-7 Aplicaciones de los materiales magnéticos

Sección 20-8 Materiales magnéticos metálicos y cerámicos

20-34 Proporcione la configuración electrónica de los elementos puros de la tabla 20-3.

20-35 En la figura 20-9*b*, ¿qué materiales tienen la más altas y más bajas magnetizaciones de saturación y coercitividades?



b)

Figura 20-9*b* Valores de magnetización de saturación y coercitividad para diferentes materiales magnéticos. (*Adaptado de* "Magnetic Materials: An Overview, Basic Concepts, Magnetic Measurements, Magnetostrictive Materials", *por G. Y. Chin et al. En D. Bloor, M. Flemings y S. Mahajan (Eds.)*, Encyclopedia of Advanced Materials, *Vol. 1, 1994, p. 1424, Tabla 1. Copyright* © 1994 Pergamon Press. Reproducido con permiso de *la editorial.*) (Repetida para el problema 20-35).

20-36 Trace el ciclo *M-H* para el Fe a 300, 500 y 1000 K.

20-37 Defina los siguientes términos: material magnético blando y material magnético duro. Trace un ciclo *M-H* común para cada material.

20-38 ¿Qué características de importancia están asociadas con los materiales magnéticos blandos?

20-39 ¿Los materiales que se usan para el almacenamiento magnético de datos son magnéticamente duros o blandos? Explique.

20-40 Proporcione ejemplos de materiales que se usan en la grabación magnética.

20-41 ¿Cuáles son las ventajas y cuáles algunas de las desventajas de usar imanes Fe-Nd-B?

20-42 Utilice los datos de la tabla 20-4 para correlacionar la permeabilidad máxima con la coercitividad. ¿Existe una tendencia potencial? 20-43 ¿Cuál es el poder magnético máximo para el Co-γ-Fe_2O_3?

20-44 Estime la potencia del material Co_5Ce de la figura 20-14.

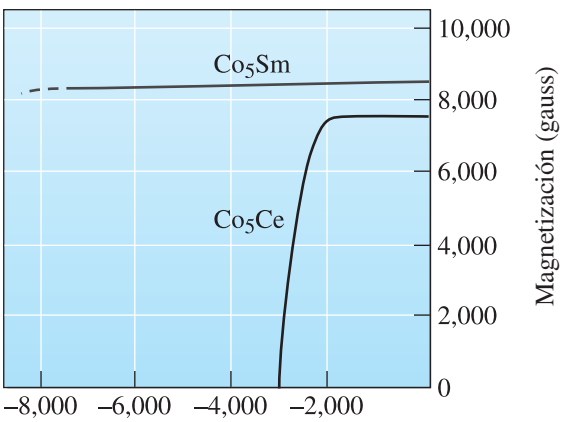


Figura 20-14 Curvas de desmagnetización para el Co_5Sm y Co_5Ce, que representan parte del ciclo de histéresis. (Repetida para el problema 20-44.)

20-45 Utilice los datos de la tabla 20-6 para ver si existe una posible relación entre $BH_{máx}$ y la temperatura de Curie.

20-46 Tome la potencia máxima del problema del ejemplo 20-3 y conviértala en unidades del SI.

20-47 Consulte la figura 20-13. ¿Cuáles son las coordenadas de M_{sat}? Utilice las unidades de A/m para ambos valores.

20-48 ¿Qué ventajas tiene el uso del material Fe-3% Si en comparación con el permalloy en motores eléctricos?

20-49 El campo coercitivo del hierro puro se relaciona con el tamaño del grano mediante la relación $H_c = 1.83 + 4.14/\sqrt{A}$, donde A es el área del grano en dos dimensiones (mm^2) y H_c aparece en A/m. Si sólo el tamaño del grano influye al 99.95% de hierro (coercitividad de 0.9 oersted), calcule el tamaño de los granos del material. ¿Qué le ocurre al valor de la coercitividad cuando el hierro se recuece para hacer crecer el grano?

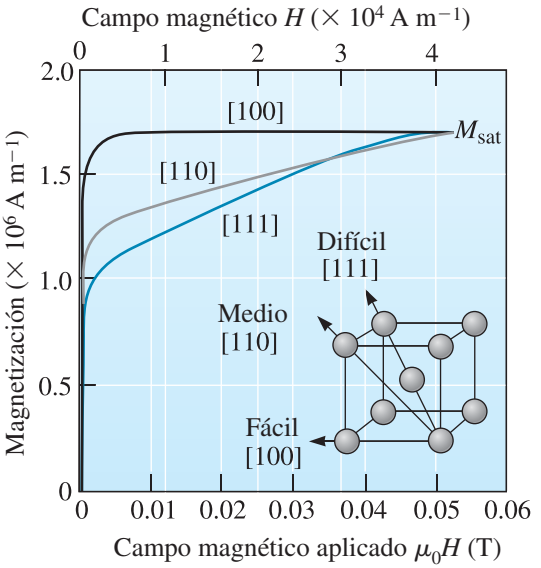


Figura 20-13 La curva de magnetización inicial del hierro es altamente anisotrópica; la magnetización es más fácil cuando las direcciones ‹100› están alineadas con el campo y se dificulta a lo largo de [111]. (*Basado en* Principles of Electrical Engineering Materials and Devices, *por S. O. Kasap, Irwin, McGraw-Hill, 1997.*) (Repetida para el problema 20-47.)

20-50 Calcule la fuerza de atracción por metro cuadrado de un imán permanente cuya magnetización de saturación es igual a 1.0 tesla.

20-51 Suponga que se sustituye 10% de los iones Fe^{2+} en magnetita con iones Cu^{2+}. Determine el momento magnético total por centímetro cúbico.

20-52 Suponga que el momento magnético total por metro cúbico en una estructura de espinel en la que iones de Ni^{2+} han reemplazado a una parte de los iones de Fe^{2+} es de 4.6×10^5 A/m. Calcule la fracción de iones de Fe^{2+} que han sido sustituidos y el porcentaje en peso del Ni presente en el espinel.

20-53 ¿Qué es magnetoestricción? ¿En qué se parece a la electroestricción? ¿Cuál es la diferencia con un efecto piezoeléctrico?

20-54 Proporcione varios ejemplos de materiales que presentan el efecto de magnetoestricción.

20-55 ¿Qué es la espintrónica? Proporcione un ejemplo de un dispositivo basado en la espintrónica

que se usa en computadoras personales y portátiles.

Problemas de diseño

20-56 Diseñe un solenoide de una longitud no mayor de 1 cm que produzca una inductancia de 3000 gauss.

20-57 Diseñe un imán permanente que tenga una remanencia de por lo menos 5000 gauss, que no pueda ser desmagnetizado si se expone a una temperatura de 400°C o a un campo magnético de 1000 oersteds y que tenga una buena potencia magnética.

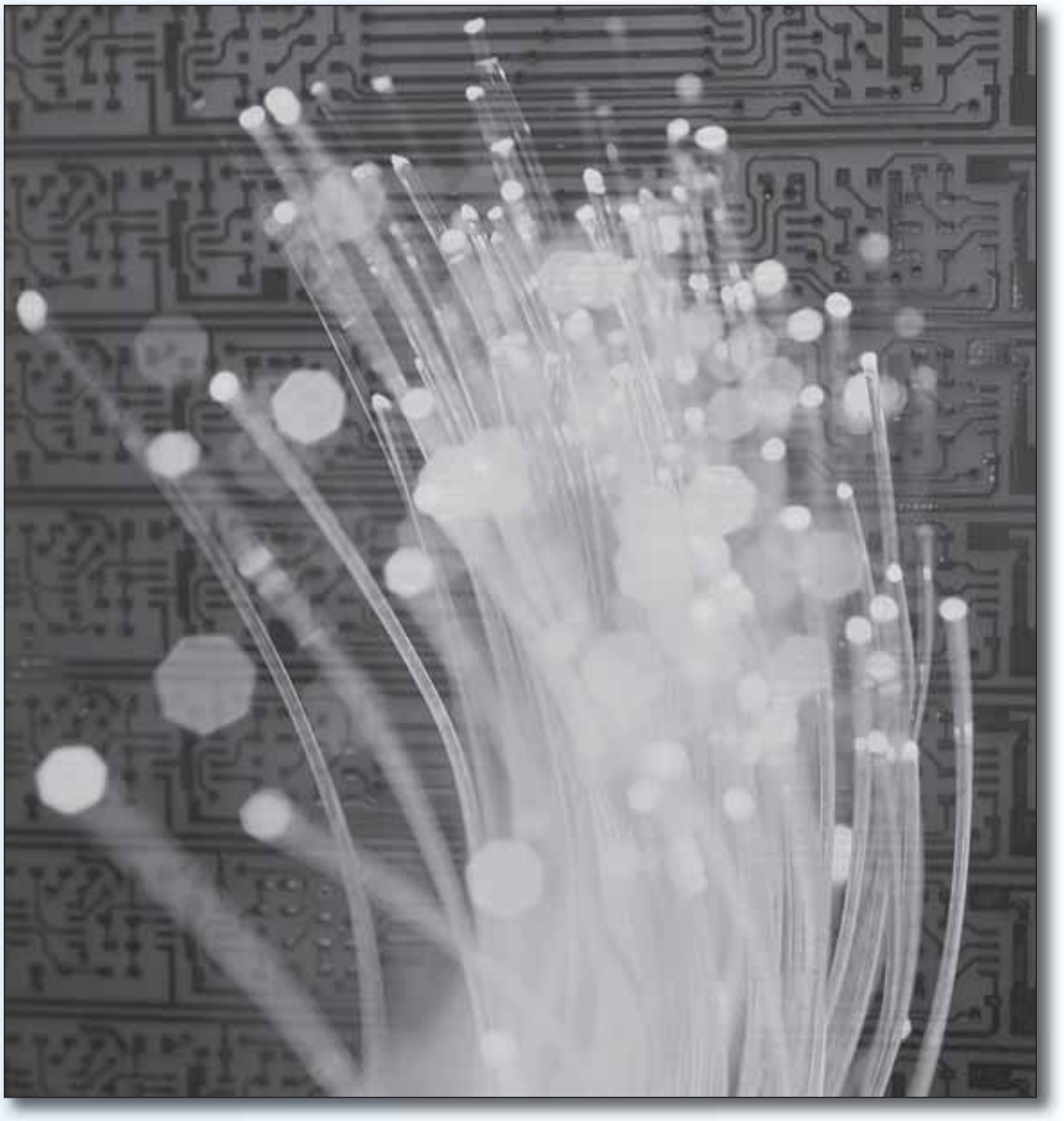
20-58 Diseñe una ferrita de estructura de espinel que produzca un momento magnético total de 5.6×10^5 A/m por metro cúbico.

20-59 Diseñe una ferrita de estructura de espinel que produzca un momento magnético total de 4.1×10^5 A/m por metro cúbico.

20-60 Diseñe un imán permanente para levantar una carga máxima de 1000 kg bajo temperaturas de operación de hasta 750°C. ¿Cuáles materiales citados en la tabla 20-6 satisfacen el requisito que se menciona aquí?

Problemas por computadora

20-61 *Conversión de unidades magnéticas.* escriba un programa de cómputo que convierta unidades magnéticas del sistema cgs, es decir, de Gauss, al sistema SI. Por ejemplo, si el usuario da un valor de la densidad de flujo en Gauss, el programa deberá dar el valor correspondiente en Wb/m^2 o en teslas.



Los materiales ópticos desempeñan una función de importancia decisiva en la infraestructura de los sistemas de comunicación y de tecnología de información. Hay millones de kilómetros de fibra óptica, como la que se ve en la fotografía, instalados en todo el mundo. La fibra óptica para comunicaciones y en servicios de salud, rayos láser para aplicaciones en medicina y manufacturas, grupos de espejos micromaquinados, diodos emisores de luz y celdas solares han hecho posible una amplia variedad de nuevas tecnologías. (*PhotoDisc Bluey Getty Images.*)

CAPÍTULO

21

Materiales fotónicos

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Por qué el cielo se ve azul?*
- *¿Cómo funciona una fibra óptica?*
- *¿Qué factores controlan la transmisión y absorción de luz en diferentes materiales?*
- *¿Qué significan las siglas LASER?*
- *¿De qué está hecho un láser de rubí?*
- *¿Si la operación de una lámpara fluorescente incluye el fenómeno de fosforescencia?*
- *¿En qué forma la invención de rayos láser azules hizo posible los discos DVD de alta definición?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Definir el término protón y calcular su energía.
- Calcular la intensidad de la luz refractada, reflejada, absorbida y transmitida por un material.
- Explicar la forma en que la estructura de banda de los materiales sólidos fomenta el surgimiento de las propiedades ópticas de los metales, semiconductores y aislantes.
- Explicar las bases físicas del funcionamiento de los aparatos optoelectrónicos como celdas solares y diodos emisores de luz.

Los materiales fotónicos u ópticos han provocado un impacto significativo en el desarrollo de la infraestructura de las comunicaciones y de tecnología de información. Los materiales fotónicos también han desempeñado un papel clave en muchas otras tecnologías relacionadas con la medicina, la fabricación y la astronomía, por mencionar algunas. Hasta ahora, se han instalado millones de miles de fibras ópticas en todo el mundo. El término "optoelectrónica" se refiere a la ciencia y tecnología que combina materiales electrónicos y ópticos. Entre éstos, se deben mencionar los diodos emisores de luz (LED), las celdas sola-

res y los láseres semiconductores. Desde simples espejos, prismas y lentes hasta los últimos materiales fotónicos de brecha de banda, el campo de los materiales y dispositivos ópticos se ha desarrollado con gran rapidez. El objetivo de este capítulo es presentar un resumen de los principios fundamentales que han servido de guía en las aplicaciones de materiales ópticos.

Las propiedades ópticas de los materiales están relacionadas con la interacción entre el material y las radiaciones electromagnéticas, en forma de ondas o de partículas de energía conocidas como fotones. Esta radiación puede tener características que se ubiquen en el espectro de la luz visible o pueden resultar invisibles para el ojo humano. En este capítulo, se explorarán dos vertientes mediante las cuales es posible utilizar las propiedades ópticas de los materiales: emisiones de fotones de los materiales e interacciones de fotones con los materiales.

21-1 El espectro electromagnético

La luz es energía, o radiación, en forma de ondas o partículas llamadas **fotones** que pueden ser emitidos de un material. Las características de importancia de los fotones, su energía E, longitud de onda λ y frecuencia ν, se relacionan entre sí con la ecuación

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \tag{21-1}$$

donde c es la velocidad de la luz (en el vacío, la velocidad c_0 es 3×10^{10} cm/s) y h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} J · s). En vista de que por electrón volt (eV) existen 1.6×10^{-19} J, el valor de h también está dado por 4.14×10^{-15} eV · s. Esta ecuación permite pensar en el fotón ya sea como una partícula de energía E o como una onda con una longitud de onda y una frecuencia características.

El espectro de la radiación eléctrica aparece en la figura 21-1. Los rayos gamma y los rayos X tienen una longitud de onda muy corta, es decir una alta frecuencia, y poseen energías muy altas; las microondas y las ondas de radio poseen energías muy reducidas y la luz visible representa sólo una parte muy angosta del espectro electromagnético. La figura 21-1 ilustra la respuesta del ojo humano a diferentes colores. También se muestran las brechas de banda (E_g) de semiconductores (en eV) y las longitudes de onda correspondientes de la luz. Como se analizó en el capítulo 19, estas relaciones se utilizan para fabricar los LED de diferentes colores.

21-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión

Todos los materiales interaccionan de alguna manera con la luz. Los fotones son los causantes de varios fenómenos ópticos cuando interaccionan con la estructura electrónica o cristalina de un material (figura 21-2). Si los fotones que inciden sobre un material interaccionan con los electrones de valencia, pueden ocurrir varias cosas. Los fotones pueden ceder su energía al material, en cuyo caso hay una *absorción*, o bien, los fotones ceden su energía pero de inmediato el material emite fotones de energía idéntica; en este caso, lo que ocurre es una *reflexión*. Por último, los fotones pueden no interaccionar con la estructura electrónica del material; entonces, lo que ocurre es una *transmisión*. No obstante, incluso en la transmisión, los fotones cambian de velocidad y se presenta la *refracción*. Es posible que una pequeña parte de la intensidad de la luz incidente se disperse con una frecuencia ligeramente distinta (dispersión de Raman).

Como se observa en la figura 21-2, un rayo incidente de intensidad I_0 puede ser reflejado, absorbido y transmitido parcialmente. La intensidad del haz incidente I_0 se puede expresar, por lo tanto, como

$$I_0 = I_r + I_a + I_t \tag{21-2}$$

donde I_r es la parte reflejada del haz, I_a es la parte absorbida e I_t es la que finalmente se transmite a través del material. La reflexión puede ocurrir tanto en la superficie delantera como en la trasera del material. La figura 21-2*a*) muestra reflexión únicamente en la superficie delantera. También ocurren

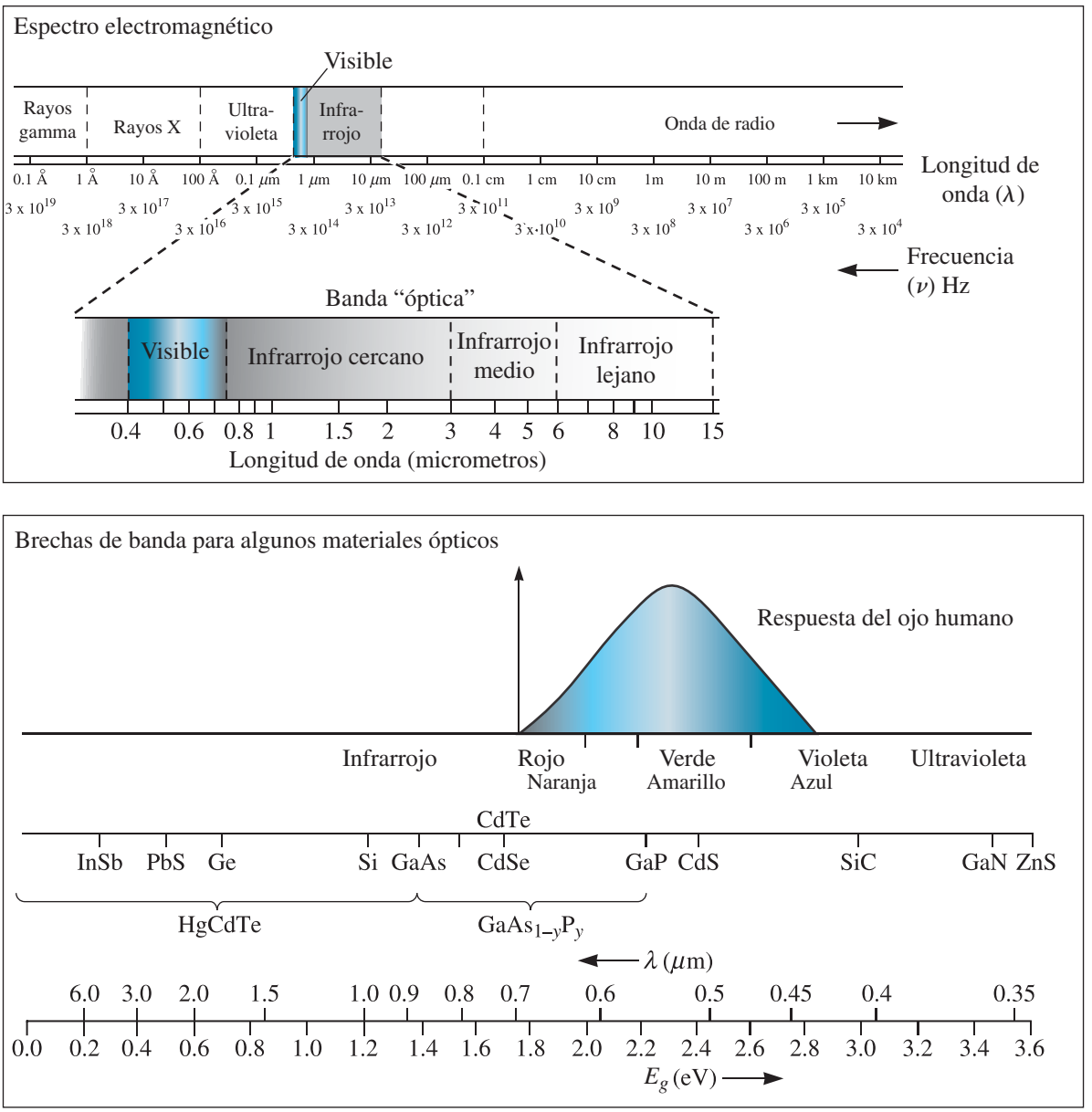


Figura 21-1 Espectro electromagnético de las radiaciones; también se muestran las brechas de banda y frecuencias de corte correspondientes a algunos materiales ópticos. (*Fuente:* Optoelectronics: An Introduction to Materials and Devices, *por J. Singh. McGraw-Hill, 1996*.)

reflexiones a ciertos ángulos con respecto a la normal de la superficie (reflexión especular) y también en muchas otras direcciones [reflexión difusa, que no se muestra en la figura 21-2*a*)]. Para determinar el comportamiento del fotón, son importantes varios factores; de particular importancia es la energía requerida para excitar un electrón y pasarlo a un estado más alto de energía.

En seguida se analiza cada uno de estos cuatro fenómenos. Comenzamos con la refracción, por estar relacionada con la reflexión y la transmisión.

Refracción

Aun cuando se transmita un fotón, éste produce la polarización de los electrones en el material y, al interaccionar con el material polarizado, pierde parte de su energía. Se puede

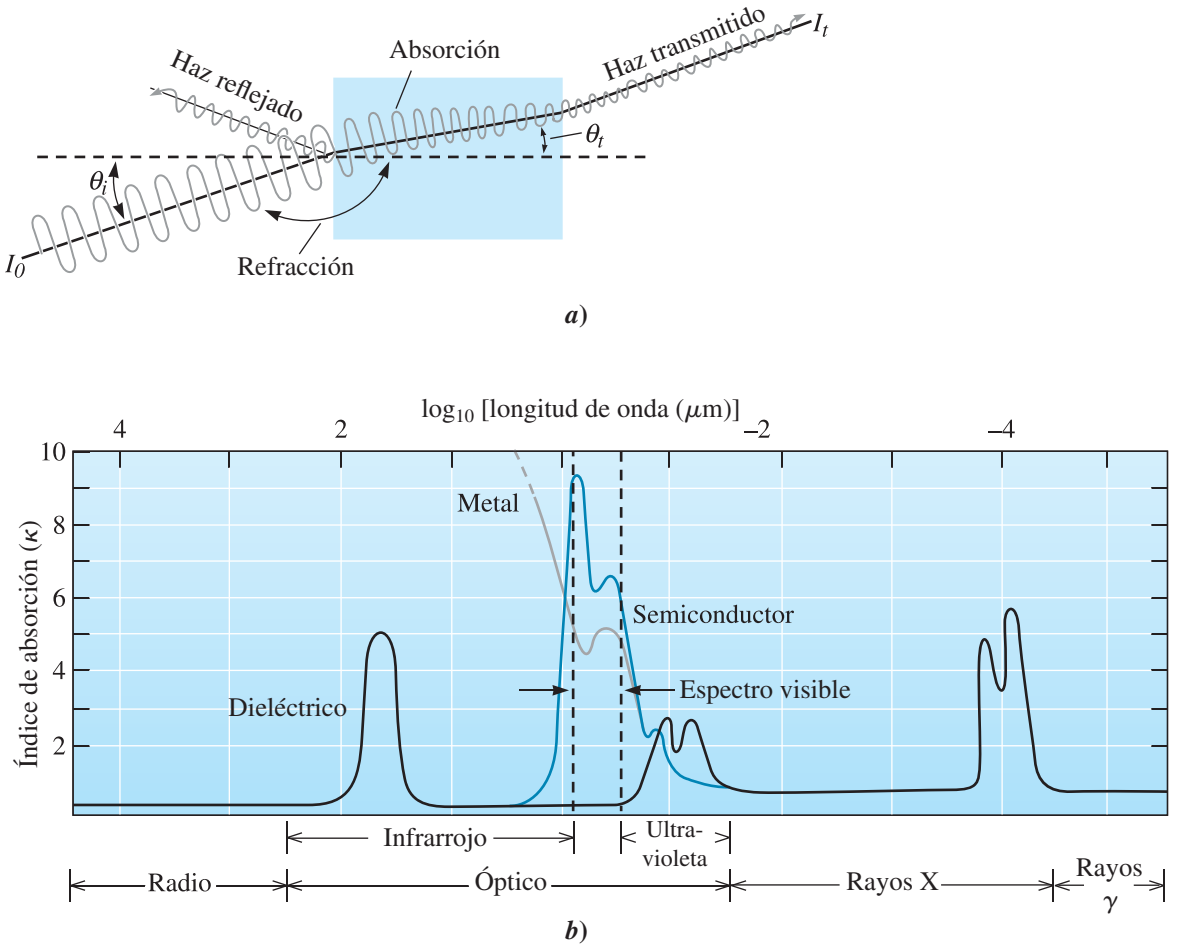


Figura 21-2 *a*) Interacción de fotones con un material. Además de la reflexión, la absorción y la transmisión, el rayo cambia de dirección, es decir, es refractado. El cambio de dirección está dado por el índice de refracción *n*. *b*) El índice de absorción (κ) es una función de la longitud de onda.

relacionar la velocidad de la luz (c) con la facilidad con la cual se polariza un material tanto eléctrica (permitividad ε) como magnéticamente (permeabilidad μ), por medio de

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{21-3}$$

En general, los materiales ópticos no son magnéticos y la permeabilidad es insignificante. En vista de que se reduce la velocidad de los fotones, el haz de fotones cambia de dirección al entrar al material [figura 21-2*a*)]. Suponga que unos fotones que se desplazan en el vacío chocan contra un material. Si θ_i y θ_t son los ángulos formados por los rayos incidente y refractado, respectivamente, en relación con la normal a la superficie del material, entonces

$$n = \frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_{\text{vacío}}}{\lambda} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_t} \tag{21-4}$$

La relación n es el **índice de refracción**, c_0 es la velocidad de la luz en un vacío (3×10^8 m/s) y c es la velocidad de la luz dentro del material. La frecuencia de la luz no cambia cuando se refracta. En la tabla 21-1 aparecen valores comunes del índice de refracción para varios materiales.

También se puede definir un índice refractivo complejo (n^*). Esto incluye a κ, parámetro conocido como índice de absorción:

$$n^* = n(1 - i\kappa) \tag{21-5}$$

Tabla 21-1 Índice de refracción para materiales seleccionados, correspondientes a fotones de una longitud de onda de 5890 Å

Material	Índice de refracción (*n*)	Material	Índice de refracción (*n*)
Aire	1.00	Poliestireno	1.60
Hielo	1.309	TiO_2	1.74
Agua	1.333	Zafiro (Al_2O_3)	1.8
Teflón[MR]	1.35	Cristal de plomo (cristal)	2.50
SiO_2 (vidrio)	1.46	Rutilo (TiO_2)	2.6
Polimetilmetacrilato	1.49	Diamante	2.417
Vidrios de silicato comunes	~1.50	Silicio	3.49
Polietileno	1.52	Arseniuro de galio	3.35
Cloruro de sodio (NaCl)	1.54	Fosfuro de indio	3.21
SiO_2 (cuarzo)	1.55	Germanio	4.0
Epoxi	1.58		

En la ecuación 21-5, $i = \sqrt{-1}$ es el número imaginario. El índice de absorción se define como

$$\kappa = \frac{\alpha\lambda}{4\pi n} \tag{21-6}$$

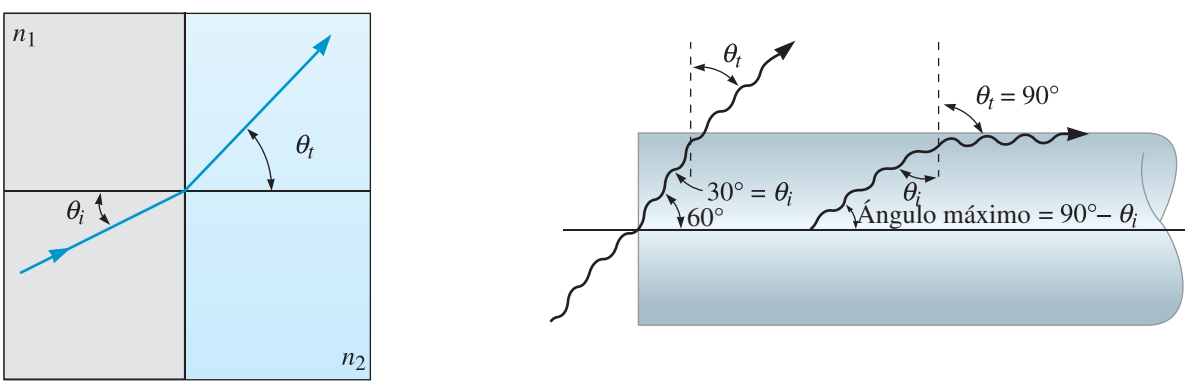
En la ecuación 21-6, α es el **coeficiente de absorción lineal** (vea la ecuación 21-12), λ es la longitud de onda de la luz y n el índice de refracción. La figura 21-2*b*) muestra la variación en índice de absorción con la frecuencia de ondas electromagnéticas. Haciendo una analogía, el índice de refracción es similar a la constante dieléctrica de los materiales y el índice de absorción es similar al factor de pérdidas dieléctricas.

Si los fotones están viajando por el material 1, en lugar del vacío, y a continuación pasan al material 2, las velocidades de los rayos incidente y refractado dependen de la relación entre sus índices de refracción, otra vez haciendo que el rayo cambie de dirección:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_t} \tag{21-7}$$

La ecuación 21-7 también se conoce como ley de Snell.

Cuando un rayo de luz entra desde un material con índice de refracción (n_1) en un material de índice de refracción (n_2), y si $n_1 > n_2$, el rayo se desvía y se aleja de la normal, hacia la superficie de frontera [figura 21-3*a*)]. Un rayo que atraviese el material 1 se refleja en vez de transmitirse si el ángulo θ_t llega a 90°.



a) *b*)

Figura 21-3 *a*) Cuando un rayo de luz pasa del material 1 al material 2, si el índice de refracción del material 1 (n_1) es más alto que el del material 2 (n_2), entonces el rayo se desvía de la normal hacia la superficie de la frontera. *b*) Diagrama de un rayo de luz en una fibra de vidrio para el ejemplo 21-1.

Cuando el material se polariza fácilmente, ocurre una mayor interacción de los fotones con la estructura electrónica del material. En el capítulo 19 se analizaron varios mecanismos de polarización dieléctrica, entre los cuales la polarización electrónica (es decir, el desplazamiento de la nube de electrones alrededor de los átomos y de los iones) es la que controla el índice de refracción de los materiales. En consecuencia, se espera contar con una relación entre el índice de refracción n y la constante dieléctrica a altas frecuencias k_∞ del material. De las ecuaciones 21-3 y 21-4 y para materiales no ferromagnéticos o no ferrimagnéticos,

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{\mu_0\varepsilon_0}} \cong \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} = \sqrt{k_\infty} \tag{21-8}$$

En la ecuación 21-8, c_0 y c son la velocidad de la luz en un vacío y en el material, respectivamente, μ_0 y μ son las permeabilidades magnéticas del vacío y del material, respectivamente, y ε_0 y ε son las permitividades del material y del vacío, respectivamente. Como ya se vio en el capítulo 19, el material conocido como "cristal de plomo" que en realidad es un vidrio de silicato amorfo con hasta ~30% de óxido de plomo, tiene un alto índice de refracción ($n \sim 2.4$), dado que los iones Pb^{2+} tienen una capacidad de polarización electrónica muy alta. Se utiliza una estrategia similar para introducir una impureza a las fibras de sílice, para incrementar el índice de refracción del núcleo de las fibras ópticas en comparación con la región periférica. Esto ayuda a conservar la luz (y, por lo tanto, la información) en el núcleo de la fibra óptica. La diferencia entre la constante dieléctrica a alta frecuencia, y la constante dieléctrica a baja frecuencia, es una medida de los demás mecanismos de polarización que están contribuyendo a la constante dieléctrica.

El índice de refracción n no es constante para un material en particular. El índice de refracción se ve afectado por la frecuencia o longitud de onda de los fotones. La **dispersión** de un material se define como la variación de su índice de refracción en función de la longitud de onda:

$$(\text{Dispersión})_\lambda = \frac{dn}{d\lambda} \tag{21-9}$$

Esta dependencia del índice de refracción en relación con la longitud de onda no es lineal. Dentro de un material, la dispersión significa que pulsos de luz de diferentes longitudes de onda, que se inician al mismo tiempo en un extremo de una fibra óptica, llegarán en momentos diferentes al otro extremo. Por tanto, la dispersión en el material desempeña un papel importante en las fibras ópticas. Ésta es una de las razones por las cuales, para la comunicación por fibras ópticas, se prefiere usar una fuente de luz de una sola longitud de onda. La dispersión también causa aberración cromática en los lentes ópticos.

En vista de que la polarización dieléctrica (P) es igual al momento del dipolo por unidad de volumen, y que la constante dieléctrica a alta frecuencia está relacionada con el índice de refracción, es de esperarse que (para un mismo material), una forma más densa o polimorfa tendrá un índice de refracción más alto (compare los índices de refracción del hielo y del agua, o bien, del vidrio y el cuarzo).

El siguiente ejemplo ilustra la forma en que se diseña una fibra óptica, para reducir al mínimo las pérdidas ópticas durante la inserción, seguido por un ejemplo de cálculo del índice de refracción.

Ejemplo 21-1 *Diseño de un sistema de fibras ópticas*

Las fibras ópticas por lo general se fabrican de vidrios de silicato de alta pureza. Están formados por un núcleo que tiene un índice de refracción que es superior al índice de refracción del recubrimiento en la fibra (el recubrimiento recibe el nombre de revestimiento). Incluso una simple fibra de vidrio en aire puede servir como fibra óptica, porque tiene un índice de refracción mayor que el del aire.

Considere un haz de fotones que es introducido desde un láser en una fibra de vidrio con índice de refracción de 1.5. Escoja el ángulo de incidencia del haz con respecto al eje de la fibra que resultará en una fuga mínima del haz desde la fibra. También considere la forma en que este ángulo puede cambiar si la fibra está sumergida en agua.

SOLUCIÓN

Para evitar fugas del rayo, se necesita una reflexión interna total y, por tanto, el ángulo θ_t debe ser por lo menos de 90°. Suponga que los fotones entran a un ángulo de 60° con respecto al eje de la

fibra. De la figura 21-3*b*), se encuentra que $\theta_i = 90° - 60° = 30°$. Si se supone que el vidrio es el material 1 y si la fibra de vidrio está en el aire ($n = 1.0$), entonces de la ecuación 21-7:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,\theta_t} \text{ o } \frac{1}{1.5} = \frac{\text{sen}\,30°}{\text{sen}\,\theta_t}$$

$$\text{sen}\,\theta_t = 1.5\ \text{sen}\,30° = 1.5(0.50) = 0.75 \text{ o } \theta_t = 48.6°$$

Como θ_t es menor a 90°, los fotones escapan de la fibra. Para evitar la transmisión, es preciso introducir los fotones en un ángulo menor, que dé $\theta_t = 90°$.

$$\frac{1}{1.5} = \frac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,\theta_t} = \frac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,90°} = \text{sen}\,\theta_i$$

$$\text{sen}\,\theta_i = 0.6667 \text{ o } \theta_i = 41.8°$$

Si el ángulo entre el haz y el eje de la fibra es $90 - 41.8 = 48.2°$ o menor, el haz se reflejará. Si la fibra estuviera sumergida en agua ($n = 1.333$), entonces

$$\frac{1.333}{1.5} = \frac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,\theta_t} = \frac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,90°} = \text{sen}\,\theta_i$$

$$\text{sen}\,\theta_i = 0.8887 \text{ o } \theta_i = 62.7°$$

En el agua, sería necesario introducir los fotones a un ángulo inferior a $90 - 62.7 = 27.3°$ para impedir la transmisión.

Ejemplo 21-2 *Transmisión de luz en polietileno*

Suponga que un rayo de fotones en el vacío choca contra una hoja de polietileno, a un ángulo de 10° en relación con la normal a la superficie del polímero. El polietileno tiene una constante dieléctrica de alta frecuencia de $k_\infty = 2.3$. Calcule el índice de refracción del polietileno, y encuentre el ángulo entre el haz incidente y el haz cuando pasa por el polímero.

SOLUCIÓN

El índice de refracción está relacionado con la constante dieléctrica de alta frecuencia:

$$n = \sqrt{k_\infty} = \sqrt{2.3} = 1.52$$

El ángulo θ_t es

$$n = \sqrt{k_\infty} = \sqrt{2.3} = 1.52$$

$$n = \frac{\text{sen}\,\theta_i}{\text{sen}\,\theta_t}$$

$$\text{sen}\,\theta_t = \frac{\text{sen}\,\theta_i}{n} = \frac{\text{sen}\,10°}{1.52} = \frac{0.174}{1.52} = 0.1145$$

$$\theta_t = 6.57°$$

Reflexión Cuando un rayo de fotones choca contra un material, los fotones interaccionan con los electrones de valencia y ceden su energía. En los metales, la radiación de casi cualquier longitud de onda excita a los electrones haciéndolos saltar a niveles más altos de energía. Se esperaría que, si se absorben totalmente los fotones, no se refleje ninguna luz y el metal se vea negro. Sin embargo, en el aluminio o en la plata, al regresar los electrones excitados a sus niveles inferiores de energía, se vuelven a emitir de inmediato fotones de longitud de onda prácticamente idéntica; esto significa que tiene lugar una reflexión. Dado que se refleja prácticamente la totalidad del espectro visible, estos metales tienen un color blanco o plateado.

La **reflectividad** R muestra la fracción del rayo incidente que se refleja y está relacionada con el índice de refracción. Si el material está en el vacío o en el aire:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \tag{21-10}$$

Si el material está en cualquier otro medio con índice de refracción n_i, entonces

$$R = \left(\frac{n-n_i}{n+n_i} \right)^2 \tag{21-11}$$

Estas ecuaciones son aplicables a la reflexión sobre una superficie y suponen una incidencia normal (perpendicular a la superficie). El valor de R depende del ángulo de incidencia. Los materiales con un alto índice de refracción tienen una mayor reflectividad que aquellos con un índice bajo. Dado que el índice de refracción varía con la longitud de onda de los fotones, igual ocurre con la reflectividad.

En los metales, la reflectividad por lo general es del orden de 0.9 a 0.95, en tanto que en los vidrios comunes se acerca a 0.05. La alta reflectividad de los metales es una de las razones por las que son *opacos*.

Existen innumerables aplicaciones en las que se desea que los materiales tengan una muy buena reflectividad. Entre ellos, se deben mencionar los espejos y ciertos tipos de recubrimientos para vidrios. De hecho, estos recubrimientos también deben diseñarse de tal manera que reflejen una gran parte del espectro electromagnético (por ejemplo, los rayos infrarrojos, es decir, la parte que produce calor). Se han creado muchos recubrimientos de este tipo para vidrios. También hay muchas aplicaciones donde la reflectividad debe limitarse al máximo. Estos recubrimientos se conocen como antirreflejantes (AR); se usan en vidrios, en los espejos retrovisores en automóviles, en ventanas y para el vidrio de cuadros de forma que se pueda ver a través del vidrio sin que aparezca ningún reflejo.

Absorción

La parte del rayo incidente que no sea reflejada por el material será absorbida o transmitida a través del mismo. La fracción del rayo que es absorbida está relacionada con el espesor del material y con la forma en que los fotones interaccionan con la estructura del mismo. La intensidad del rayo después de haber pasado a través del material está dada por

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \tag{21-12}$$

donde x es la trayectoria por la que se mueven los fotones (por lo general, el espesor del material), α es el coeficiente de absorción lineal del material para esos fotones, I_0 es la intensidad del rayo después de haber sido reflejado en la superficie anterior e I es la intensidad del rayo al llegar a la superficie posterior. La ecuación 21-12 también se conoce como ley de Bouguer, o ley de Beer-Lambert. La figura 21-4 muestra el coeficiente de absorción lineal como función de la longitud de onda para varios metales.

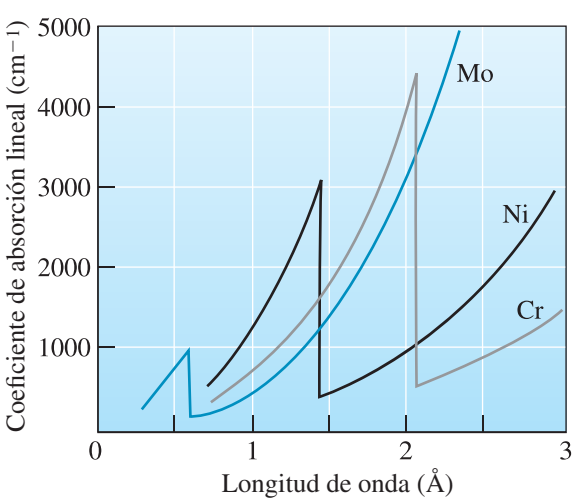


Figura 21-4 Coeficiente de absorción lineal respecto a longitudes de onda para varios metales. Observe la repentina disminución del coeficiente de absorción para longitudes de onda mayores que la del margen de absorción

La absorción en materiales se presenta por varios mecanismos. En la *dispersión de Rayleigh*, los fotones interaccionan con los electrones que giran en su órbita alrededor de un átomo y son desviados sin ningún cambio en su energía fotónica; éste es un ejemplo de dispersión "elástica". La dispersión de Rayleigh es más importante para energías fotónicas más altas y es causante del color del cielo. Como el extremo azul (alta energía) del espectro visible se dispersa con más eficiencia, la luz solar dispersada por moléculas y partículas atmosféricas que llega a nuestros ojos es azul en su mayor parte. El efecto es bastante fuerte, porque la intensidad de dispersión es proporcional a la energía de los fotones elevada a la cuarta potencia. La dispersión de Rayleigh también depende del tamaño de las partículas y es más eficiente para partículas que son mucho menores que la longitud de onda de la luz. La dispersión desde partículas mucho más grandes que la longitud de onda de la luz ocurre por el *efecto Tyndall*. Esta es la razón por la que las nubes, formadas por pequeñas gotas de agua, se ven blancas. La *dispersión de Compton* también ocurre cuando un fotón interacciona con un electrón, pero como el fotón entrante pierde parte de su energía al electrón, aumenta la longitud de onda de la luz; este es un ejemplo de dispersión "inelástica".

El *efecto fotoeléctrico* ocurre cuando la energía de un fotón es completamente absorbida, resultando en la expulsión de un electrón desde un átomo. El átomo entonces se ioniza. No se expulsan electrones cuando los fotones entrantes tienen energías menores que la energía de enlace electrónica, cualquiera que sea la intensidad de la luz. Cuando los fotones tienen energías mayores que la energía de enlace, los electrones son expulsados con una energía cinética igual a la energía fotónica menos la energía de enlace. Cuando la energía del fotón aumenta (o la longitud de onda disminuye; vea la figura 21-4), ocurre menos absorción hasta que el fotón tenga una energía igual a la de la energía de enlace. En este nivel de energía, el coeficiente de absorción aumenta abruptamente, porque ahora los electrones pueden ser expulsados, con lo cual resulta un medio eficiente para absorber fotones. La energía o longitud de onda a la que esto ocurre se conoce como **margen de absorción** por la forma de los picos en la figura 21-4. El abrupto cambio en el coeficiente de absorción corresponde a la energía necesaria para remover un electrón del átomo; este margen de absorción es importante para ciertas técnicas analíticas de rayos X. Albert Einstein recibió el Premio Nobel de Física en 1921 por explicar el efecto fotoeléctrico.

En algunos casos, el efecto de dispersión se puede escribir como

$$I = I_0 \exp\left[(-\alpha_i + \alpha_s)x\right] \tag{21-13}$$

En la ecuación 21-13, α_i es lo que en otro tiempo se identificaba como α, que es el coeficiente de absorción intrínseca, y α_s es el coeficiente de dispersión.

En la tabla 21-2 se incluyen ejemplos de una parte de los espectros característicos para varios elementos. Las líneas K_α, K_β y L_α corresponden a las longitudes de onda de radiación emitida desde transiciones de electrones entre capas, como se verá más adelante en el capítulo.

Tabla 21-2 Líneas de emisión y márgenes de absorción características para elementos seleccionados

Metal	K_α(Å)	K_β (Å)	L_α (Å)	Margen de absorción (Å)
Al	8.337	7.981	—	7.951
Si	7.125	6.768	—	6.745
S	5.372	5.032	—	5.018
Cr	2.291	2.084	—	2.070
Mn	2.104	1.910	—	1.896
Fe	1.937	1.757	—	1.743
Co	1.790	1.621	—	1.608
Ni	1.660	1.500	—	1.488
Cu	1.542	1.392	13.357	1.380
Mo	0.711	0.632	5.724	0.620
W	0.211	0.184	1.476	0.178

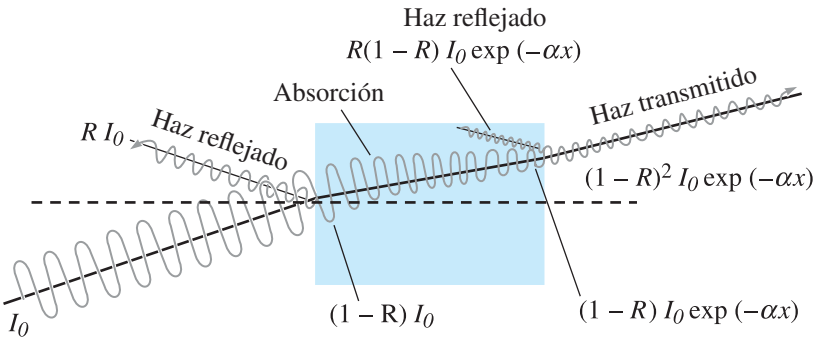


Figura 21-5 Fracciones del haz original que son reflejadas, absorbidas y transmitidas

Transmisión La fracción del haz que no es reflejada o absorbida se transmite a través del material. Con el uso de los pasos siguientes, se puede determinar la parte del haz que es transmitida (vea la figura 21-5).

1. Si la intensidad incidente es I_0, entonces la pérdida debida a reflexión en la cara anterior de los materiales es RI_0. La fracción del rayo incidente que en realidad penetra el material es $I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0$:

$$I_{\text{reflejada en la cara anterior}} = RI_0$$
$$I_{\text{después de la reflexión}} = (1 - R)I_0$$

2. Una parte del haz que entra al material se pierde por absorción. La intensidad después de pasar por el material que tenga un grosor x es

$$I_{\text{después de absorción}} = (1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

3. Antes de que el haz parcialmente absorbido salga del material, ocurre una reflexión en la superficie posterior. La parte del haz que llega a la superficie posterior y es reflejada es

$$I_{\text{reflejada en la cara posterior}} = R(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

4. En consecuencia, la parte del haz que es transmitida por completo por el material es

$$\begin{aligned} I_{\text{transmitida}} &= I_{\text{después de la absorción}} - I_{\text{reflejada en parte posterior}} \\ &= (1 - R)I_0 \exp(-\alpha x) - R(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x) \\ &= (1 - R)(I - R)I_0 \exp(-\alpha x) \\ I_t &= (1 - R)^2 I_0 \exp(-\alpha x) \end{aligned} \tag{21-14}$$

La intensidad del haz transmitido puede depender de la longitud de onda de los fotones del haz. En metales, en vista de que no hay brecha de energía, prácticamente cualquier fotón tiene suficiente energía para excitar un electrón a un nivel superior de energía, absorbiendo así la energía del fotón excitado [figura 21-6*a*)]. En consecuencia, incluso muestras extremadamente delgadas de metales son opacas. Los dieléctricos, por el contrario, poseen una gran brecha de energía entre las bandas de valencia y de conducción. Si la energía de los fotones incidentes es menor que la brecha de energía, no hay electrones que ganen suficiente energía para escapar de la banda de valencia y, por lo tanto, no ocurre absorción [figura 21-6*b*)]. En semiconductores intrínsecos, la brecha de energía es más pequeña que la de aislantes, y ocurre absorción cuando los fotones tienen energías que rebasan la brecha de energía E_g, mientras que ocurre transmisión para fotones con menos energía [figura 21-6*b*) que también se aplica a semiconductores]. En otras palabras, sólo se absorbe luz debajo de cierta longitud de onda. Los semiconductores extrínsecos incluyen niveles de energía de donantes y aceptantes

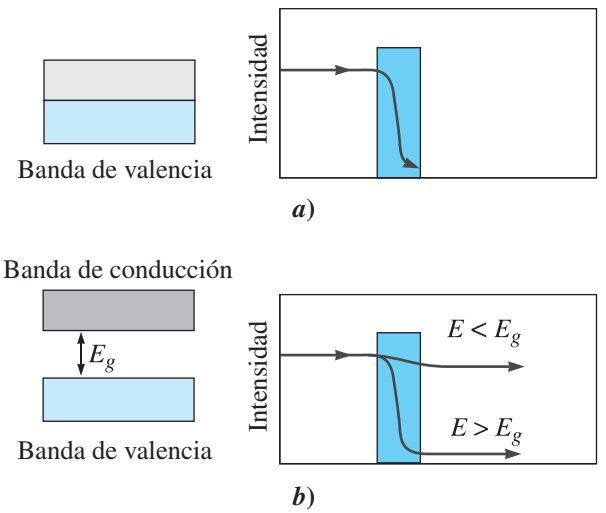


Figura 21-6 Relaciones entre absorción y la brecha de energía: *a*) metales y *b*) dieléctricos y semiconductores intrínsecos. El diagrama de la izquierda representa la estructura de banda del material bajo consideración. El diagrama de la derecha representa la intensidad de la luz cuando pasa del aire y penetra en el material y vuelve al aire.

dentro de la brecha de banda que proporciona niveles adicionales de energía para absorción. Así, los semiconductores son opacos a la radiación de longitud de onda corta pero transparentes a fotones de longitud de onda larga (vea el ejemplo 21-3). Por ejemplo, el silicio y el germanio aparecen opacos a la luz visible, pero son transparentes a la radiación infrarroja de longitud de onda más larga. Muchos de los semiconductores de brecha de banda angosta (por ejemplo HgCdTe) se usan para detección de la radiación infrarroja. Estos materiales detectores tienen que ser enfriados a temperaturas bajas (por ejemplo, usando nitrógeno líquido), porque de otra forma la energía térmica de los electrones a temperatura ambiente es suficiente para saturar la banda de conducción.

La intensidad del rayo transmitido también depende de características microestructurales. En los materiales cerámicos, la porosidad dispersa a los fotones; incluso una pequeña cantidad de porosidad (menos de 1% en volumen) puede hacer que el material cerámico sea opaco. Por ejemplo, la alúmina, que tiene una densidad relativamente baja, es opaca, en tanto que una alúmina de alta densidad es ópticamente transparente. Este material se usa con frecuencia en la fabricación de focos. Los precipitados cristalinos, en particular aquellos que tienen un índice de refracción muy distinto del material de la matriz, también provocan dispersión. Estos *opacadores* cristalinos hacen que un vidrio, que por lo general puede tener una buena transparencia, se haga translúcido o incluso opaco. Por lo general, poros o precipitados más pequeños provocan una mayor reducción en la transmisión de luz.

La **fotoconducción** se presenta en materiales semiconductores si el semiconductor forma parte de un circuito eléctrico. Si es suficiente la energía del fotón que llega, se excita un electrón hacia la banda de conducción o se crea un orificio en la banda de valencias. Entonces el electrón o el orificio transportan una carga a través del circuito [figura 21-7*a*)]. La máxima longitud de onda del fotón incidente que producirá fotoconducción está relacionada con la brecha de energía en el material semiconductor:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{hc}{E_g} \tag{21-15}$$

Se puede utilizar este principio para los fotodetectores u "ojos eléctricos" que abren y cierran puertas o abren y cierran interruptores cuando se bloquea un haz de luz enfocado sobre un material semiconductor.

Las **celdas solares** también usan la absorción de luz para generar un voltaje [figura 21-7*b*)]. En esencia, los pares electrón-orificio generados por absorción óptica están separados, lo cual lleva a la aparición de un voltaje. Este voltaje crea un flujo de corriente en un circuito externo. Las celdas solares son uniones *p-n* diseñadas de forma que los fotones exciten a los electrones hacia la banda de conducción. Los electrones se mueven al lado *n* de la unión, en tanto que los orificios se mueven al lado *p* de la unión. Este movimiento produce un voltaje de contacto debido al desequilibrio de

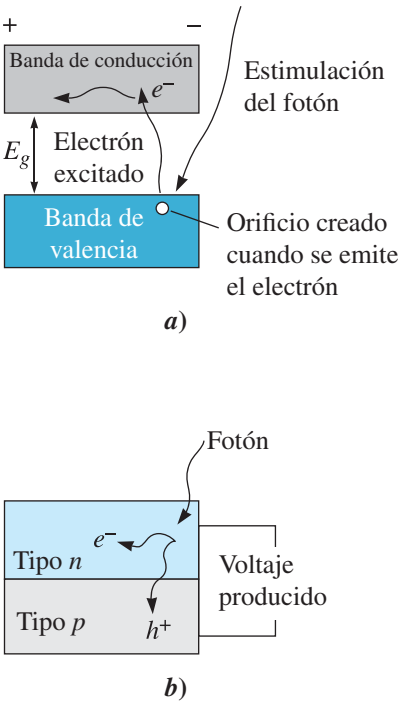


Figura 21-7 *a*) Fotoconducción en semiconductores que comprende la absorción de un estímulo por electrones excitados que salen de la banda de valencia hacia la banda de conducción. En lugar de regresar a la banda de valencia para provocar una emisión, los electrones excitados transportan una carga por un circuito eléctrico. *b*) Una celda solar aprovecha este efecto.

cargas. Si la unión *p*-*n* se conecta a un circuito eléctrico, la unión actúa como batería para energizar el circuito. Las celdas solares hacen uso de recubrimientos antirreflejantes de modo que se capten al máximo los elementos clave del espectro solar.

LED Como ya se vio en el capítulo 19, la luz absorbida por un semiconductor de brecha de banda directa hace que los electrones sean promovidos a la banda de conducción. Cuando estos electrones vuelven a la banda de valencia, se combinan con los orificios provocando emisiones de luz. Se pueden adaptar muchas soluciones sólidas semiconductoras para tener brechas de banda diferentes y producir diodos LED de distintos colores. Este fenómeno también se usa en los diodos emisores de luz y en los láseres semiconductores (figura 21-8). El diseño de los LED se estudia más adelante en este capítulo.

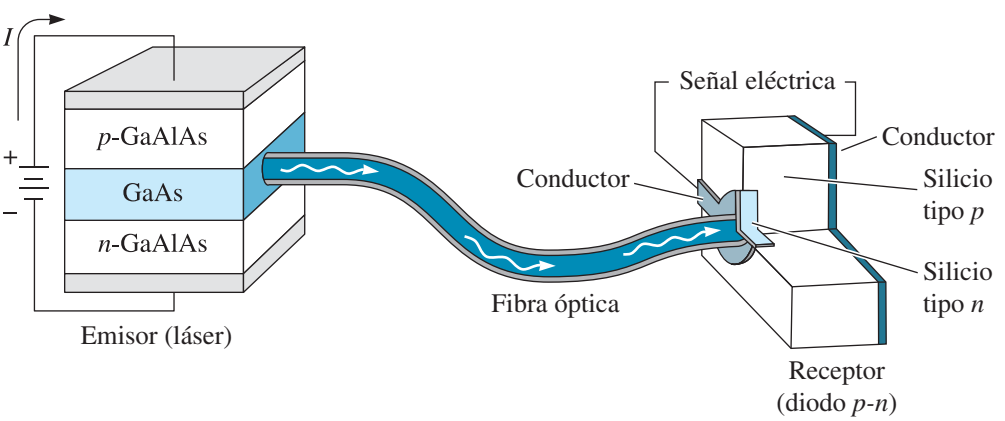


Figura 21-8 Los elementos de un sistema fotónico para transmitir información incluyen un láser o LED para generar fotones a partir de una señal eléctrica, fibras ópticas para transmitir el haz de fotones de manera eficiente y un receptor LED para convertir los fotones de nuevo en una señal eléctrica.

Los siguientes ejemplos ilustran aplicaciones de muchos de estos conceptos relacionados con la absorción y la transmisión de luz.

Ejemplo 21-3 *Determinación de brechas de energía críticas*

Determine las brechas de energía críticas para un semiconductor que dé transmisión completa, así como absorción completa de fotones del espectro visible.

SOLUCIÓN

Para que ocurra una transmisión completa, la brecha de banda del semiconductor debe ser más grande que las energías de todos los fotones del espectro visible. El espectro de luz visible varía de 4×10^{-5} cm a 7×10^{-5} cm. Los fotones con longitudes de onda más cortas tienen energías más altas. Entonces, la mínima energía E_g de brecha de banda necesaria para asegurar que ninguno de los fotones del espectro visible sea absorbido (y todos los fotones sean transmitidos) es

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10}\,\text{cm/s})}{(4 \times 10^{-5}\,\text{cm})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} = 3.1\,\text{eV}$$

Si la brecha de banda del semiconductor es 3.1 eV o mayor, todos los fotones del espectro visible serán transmitidos.

Para que un fotón sea absorbido, la brecha de energía del semiconductor debe ser menor que la energía del fotón. Los fotones con longitudes de onda más largas tienen menores energías. Por lo tanto, la máxima energía de brecha de banda que tomará en cuenta la absorción completa de todas las longitudes de onda del espectro visible es

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10}\,\text{cm/s})}{(7 \times 10^{-5}\,\text{cm})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} = 1.8\,\text{eV}$$

Si la brecha de banda es 1.8 eV o menor, todos los fotones del espectro visible serán absorbidos. Para semiconductores con una E_g entre 1.8 y 3.1 eV, una parte de los fotones del espectro visible será absorbida.

Ejemplo 21-4 *Diseño de un escudo contra la radiación*

Un material tiene una reflectividad de 0.15 y un coeficiente de absorción (α) de 100 cm^{-1}. Diseñe un escudo que permita la transmisión de sólo 1% de la radiación incidente a través del material.

SOLUCIÓN

De la ecuación 21-14, la fracción de la intensidad incidente que será transmitida es

$$\frac{I_t}{I_0} = (1 - R)^2 \exp(-\alpha x)$$

y se puede determinar el grosor necesario del escudo:

$$0.01 = (1 - 0.15)^2 \exp(-100x)$$

$$\frac{0.01}{(0.85)^2} = 0.01384 = \exp(-100x)$$

$$\ln(0.01384) = -4.28 = -100x$$

$$x = 0.0428\ \text{cm}$$

El material debe tener un grosor de 0.0428 cm para que sólo transmita 1% de la radiación incidente.

Si así se deseara, se podría determinar la cantidad de radiación que se pierde en cada paso:

$$\text{Reflexión en la cara anterior: } I_r = RI_0 = 0.15I_0$$
$$\text{Intensidad después de la reflexión: } I = I_0 - 0.15I_0 = 0.85I_0$$
$$\text{Intensidad después de la absorción: } I_a = (0.85)\mathrm{I}_0 \exp[(-100)(0.0428)] = 0.0118I_0$$
$$\text{Intensidad absorbida: } 0.85I_0 - 0.0118I_0 = 0.838I_0$$
$$\text{Reflexión en la cara posterior: } I_r = R(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$
$$= (0.15)(1 - 0.15)I_0 \exp[-(100)(0.0428)] = 0.0018I_0$$

21-3 Absorción, transmisión o reflexión selectivas

Cuando los fotones se absorben, transmiten o reflejan de manera selectiva, se observa un comportamiento óptico fuera de lo común. Ya hemos visto que los semiconductores transmiten fotones de longitud de onda larga, pero absorben radiaciones de longitud de onda corta. Existe una diversidad de situaciones en las cuales una selectividad similar produce propiedades ópticas no comunes.

En ciertos materiales, el reemplazo de los iones normales por transición o por elementos de tierras raras produce un *campo de cristal*, el cual crea nuevos niveles de energía dentro de la estructura. Este fenómeno se presenta cuando los iones Cr^{3+} reemplazan en el Al_2O_3 a los iones Al^{3+}. Los nuevos niveles de energía absorben luz visible en las porciones violeta y verde-amarillo del espectro. Las longitudes de onda del rojo se transmiten, dando el color rojizo en el rubí. Además, el reemplazo del ion Cr genera un nivel de energía que permite que aparezca la luminiscencia (se analiza más adelante) cuando los electrones son excitados por un estímulo. Los rayos láser generados a partir del rubí impurificado con cromo producen, por esta razón, un rayo o haz rojo característico.

Los vidrios también pueden impurificarse con iones que producen absorción y transmisión selectivas (tabla 21-3). Del mismo modo, trampas de electrones u orificios llamados *centros F*, pueden estar presentes en cristales. Cuando se forma fluorita (CaF_2) para que exista un exceso de calcio, se produce una vacancia de ion de fluoruro. Para mantener neutralidad eléctrica, un electrón queda atrapado en la vacancia, produciendo niveles de energía que absorben todos los fotones visibles, a excepción del morado.

Los polímeros, en particular los que contienen un anillo aromático en su estructura, pueden tener enlaces covalentes complejos que producen una estructura de nivel de energía que provoca absorción selectiva. Por esta razón, la clorofila de las plantas aparece verde, y la hemoglobina de la sangre aparece roja.

Tabla 21-3 Efecto de los iones en los colores producidos en vidrios

Ion	Color	Ion	Color
Cr^{2+}	Azul	Mn^{2+}	Naranja
Cr^{3+}	Verde	Fe^{2+}	Azul-verde
Cu^{2+}	Azul-verde	U^{6+}	Amarillo

21-4 Ejemplos y uso de fenómenos de emisión

Algunos ejemplos particulares de los fenómenos de emisión que, por sí mismos, logran algunas funciones conocidas e importantes son los siguientes.

Rayos gamma. Interacciones nucleares

Los rayos gamma, que son fotones de muy alta energía, son emitidos durante la desintegración radiactiva de los núcleos inestables de ciertos átomos. La energía de los rayos gamma, por lo tanto, depende de la estructura del núcleo atómico y varía de un material a otro. Los rayos gamma producidos de un material tienen

longitudes de onda fijas. Por ejemplo, cuando se desintegra el cobalto 60 se emiten rayos gamma con energías de 1.17×10^6 y 1.34×10^6 eV (es decir, longitudes de onda de 1.06×10^{-10} cm y 0.93×10^{-10} cm). Los rayos gamma pueden utilizarse como fuente de radiación para detectar fallas que ocurren dentro de un material (una prueba no destructiva).

Rayos X. Interacciones en las capas electrónicas internas

Los **rayos X**, que tienen una energía un poco menor que la de los rayos gamma, se producen al estimular los electrones en las capas internas de un átomo. El estímulo puede ser de electrones de alta energía u otros rayos X. Al ocurrir la estimulación, se emiten rayos X de una amplia gama de energía. Se producen un espectro continuo y uno característico de los rayos X.

Suponga que un electrón de alta energía choca contra un material. Conforme el electrón se desacelera, se libera energía y se emite en forma de fotones. Cada vez que un electrón choca con un átomo, cede una parte de su energía. Sin embargo, cada interacción puede ser más o menos severa, por lo que el electrón va cediendo cada vez una fracción distinta de su energía y genera fotones de longitudes de onda diferentes (figura 21-9). Se produce un **espectro continuo** (la parte lisa de las curvas de la figura 21-10). En el caso de que el electrón perdiera toda su energía en un impacto, la longitud de onda mínima de los fotones emitidos correspondería a la energía original del estímulo. La longitud de onda mínima de rayos X producida recibe el nombre de **límite de longitud de onda**

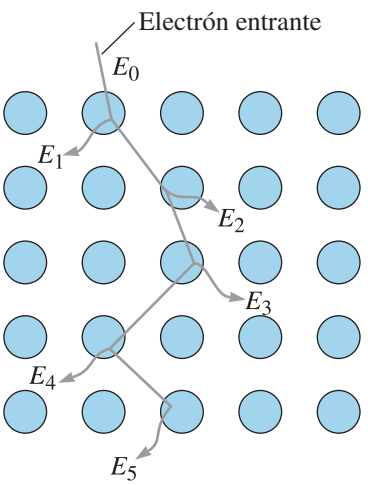


Figura 21-9 Cuando un electrón acelerado choca e interactúa con un material, su energía se puede reducir en una serie de pasos. En el proceso, se emiten varios fotones de energías diferentes E_1 a E_5, cada uno de ellos con una longitud de onda única.

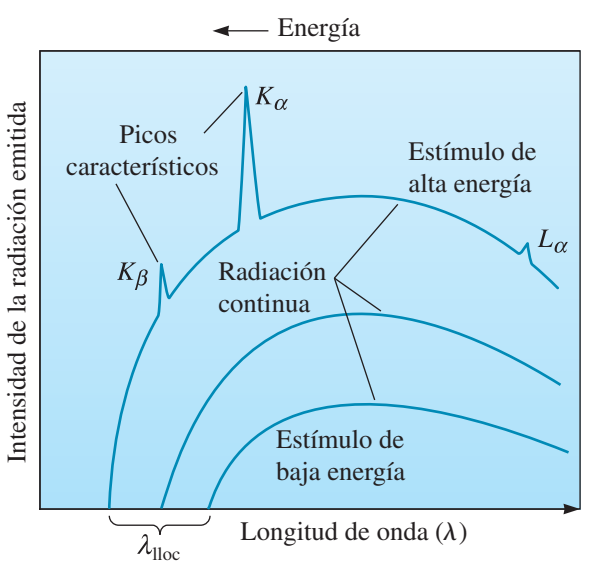


Figura 21-10 Espectros continuos y característicos de radiación emitida desde un material. Los estímulos de baja energía producen un espectro continuo de fotones de baja energía y de longitud de onda larga. Cuando el estímulo es más poderoso, se emite un espectro más intenso y de energía más alta, hasta que, finalmente, se observa la radiación característica.

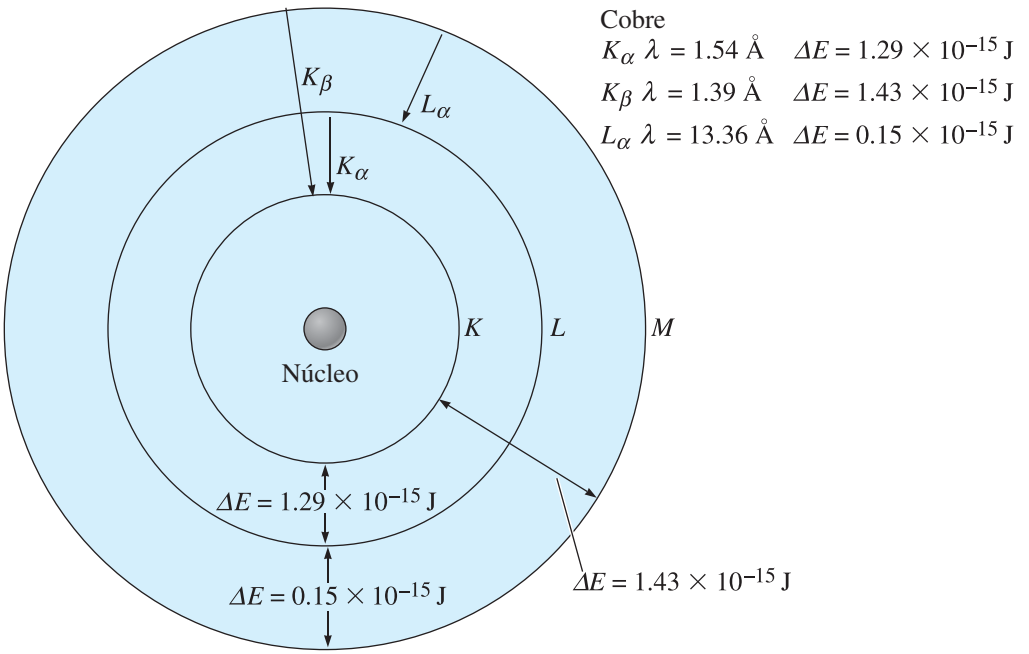


Figura 21-11 Cuando los electrones cambian de un nivel de energía a otro nivel inferior, se producen rayos X característicos, como se ilustra aquí para el cobre. La energía y la longitud de onda de los rayos X están fijadas por las diferencias de energía entre los niveles de energía.

corta λ_{lloc}. El límite de longitud de onda corta disminuye, y aumenta el número y energía de los fotones emitidos cuando se incrementa la energía del estímulo.

El estímulo entrante puede tener suficiente energía para excitar un electrón de una capa interna hacia una capa externa de energía. El electrón excitado no es estable y, para recuperar el equilibrio, el nivel energético interior se llena con electrones de un nivel superior. Este proceso lleva a la emisión de un **espectro característico** de rayos X que es distinto para cada tipo de átomo.

El espectro característico se produce porque existen diferencias discretas de energía entre dos niveles cualesquiera de energía. Cuando un electrón baja de un nivel a un segundo nivel inferior, se emite un fotón con esa energía y longitud de onda particulares. Este efecto se ilustra en la figura 21-11. En general, los niveles de energía utilizan la designación K, L, M, …, como se describe en el capítulo 2. Si un electrón se excita partiendo de la capa K, esta vacancia puede llenarse con electrones de una capa externa. Por lo general, estas vacancias se llenan con electrones provenientes de las capas más cercanas. Entonces, se emiten fotones con energías $\Delta E = E_K - E_L$ (rayos X K_α) o $\Delta E = E_K - E_M$ (rayos X K_β). Cuando un electrón de la capa M llena la capa L, se emite un fotón de energía $\Delta E = E_L - E_M$ (rayos X L_α); tiene una longitud de onda larga, o una baja energía. Observe que se requiere un estímulo más enérgico para la producción de rayos X K_α que los necesarios para los rayos X L_α.

Como consecuencia de la emisión de fotones que tienen una longitud de onda característica, sobre el espectro continuo se superpone una serie de picos (figura 21-10). Las longitudes de onda a las cuales se presentan dichos picos son específicas para el tipo de átomo (tabla 21-2). Por lo tanto, cada elemento produce un espectro característico diferente que sirve como "huella dactilar" para dicho tipo de átomo. Si se hacen coincidir las longitudes de onda características emitidas con las esperadas para diversos elementos, se puede determinar la identidad del material. También es posible medir la intensidad de los picos característicos. Al comparar intensidades medidas con las estándar, es posible estimar cuál es el porcentaje de cada tipo de átomo de material y entonces estimar la composición del mismo. Cuando un haz de electrones choca con una muestra (como ocurre en un microscopio electrónico de transmisión o barrido) se puede analizar la energía o la longitud de onda de los rayos X emitidos, para obtener información química de una muestra. Esta técnica se conoce como análisis

de dispersión de energía de rayos X (EDXA). Los ejemplos que siguen ilustran la aplicación de las emisiones de rayos X que se utilizan en las técnicas de análisis XRD y EDXA.

Ejemplo 21-5 *Diseño y selección de materiales para un filtro de rayos X*

Diseñe un filtro que absorba de manera selectiva emisiones K_β de rayos X del espectro del níquel, pero que permita pasar con poca absorción las emisiones K_α. Este tipo de filtro se usa en análisis de materiales por difracción de rayos X .

SOLUCIÓN

Cuando se determina una estructura cristalina o se identifican materiales desconocidos aplicando diversas técnicas de difracción de rayos X, es preferible usar rayos X de una sola longitud de onda. Si se encuentran los dos picos característicos K_α y K_β e interaccionan con el material, el análisis resulta mucho más difícil.

Para evitar esta dificultad, se puede usar una absorción selectiva para aislar el pico K_α. La tabla 21-2 incluye la información que se necesita. Si el material de filtro se selecciona de modo que el margen de absorción se encuentre entre las longitudes de onda K_α y K_β, entonces la K_β casi se absorbe por completo, mientras que la K_α se transmite casi completamente. En el níquel, $K_\alpha = 1.660$ Å y $K_\beta = 1.500$ Å. Un filtro con un margen de absorción entre estos picos característicos funcionará. El cobalto, con un margen de absorción de 1.608 Å, no sería opción. La figura 21-12 muestra la forma en que ocurre este proceso de filtrado.

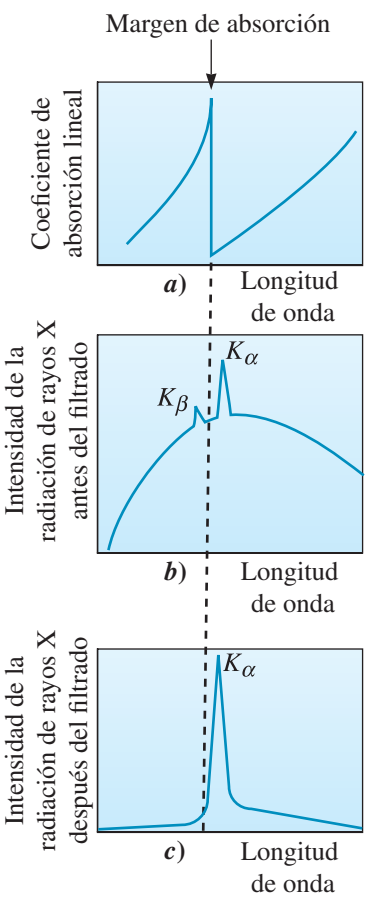


Figura 21-12 Los elementos tienen una falta selectiva de absorción de ciertas longitudes de onda. Si se selecciona un filtro con un margen de absorción entre los picos K_α y K_β de un espectro de rayos X, todos los rayos X, excepto el K_α, son absorbidos (para el ejemplo 21-5). *a*) Coeficiente de absorción lineal de un material de filtro como función de una longitud de onda; *b*) intensidad de la radiación de rayos X antes del filtrado, y *c*) intensidad de la radiación de rayos X después del filtrado.

Ejemplo 21-6 *Diseño de un filtro de rayos X*

Diseñe un filtro que transmita por lo menos 95% de la energía de un haz compuesto de rayos X K_α de zinc, usando aluminio como material de escudo. (El aluminio tiene un coeficiente de absorción lineal de 108 cm^{-1}.) Suponga que no hay pérdida por reflexión.

SOLUCIÓN

Suponiendo que no hay pérdidas provocadas por la reflexión de rayos X provenientes del aluminio, simplemente se necesita escoger el grosor del aluminio que se requiere para transmitir 95% de la intensidad incidente. La intensidad final, por tanto, será de $0.95I_0$. Entonces, de la ecuación 21-12,

$$\ln\left(\frac{0.95I_0}{I_0}\right) = -(108)(x)$$

$$\ln(0.95) = -0.051 = -108x$$

$$x = \frac{-0.051}{-108} = 0.00047\,\text{cm}$$

Se desearía laminar el aluminio a un grosor de 0.00047 cm o menos. El filtro podría ser más grueso si se seleccionara un material que tenga un menor coeficiente de absorción lineal para rayos X K_α de zinc.

Ejemplo 21-7 *Generación de rayos X a partir de difracción de rayos X*

Suponga que un electrón acelerado por 5000 eV choca contra un objetivo de cobre. ¿Qué rayos X se emitirán de este objetivo de cobre, los K_α, K_β o L_α?

SOLUCIÓN

El electrón debe poseer energía suficiente para excitar un electrón a un nivel superior, o su longitud de onda debe ser inferior a la que corresponda a la diferencia de energía entre las capas:

$$E = (5000\,\text{eV})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV}) = 8 \times 10^{-16}\,\text{J}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10}\,\text{cm/s})}{8 \times 10^{-16}\,\text{J}}$$

$$= 2.48 \times 10^{-8}\,\text{cm} = 2.48\ \text{Å}$$

Observe que un electrón volt (eV) es la energía cinética adquirida por un electrón que se mueve por una diferencia de potencial de un volt.

Para el cobre, K_α es 1.542 Å, K_β es 1.392 Å y L_α es 13.357 Å (tabla 21-2). Por lo tanto, el pico L_α puede ser producido, no así los K_α y K_β.

Ejemplo 21-8 *Análisis de dispersión de energía de rayos X (EDXA)*

La microfotografía de la figura 21-13 se obtuvo con el uso de un microscopio electrónico de barrido a una amplificación de 1000. El haz de electrones del microscopio electrónico fue dirigido en tres fases diferentes, creando rayos X y produciendo los picos característicos. De los espectros de energía, determine la probable composición de cada fase. Suponga que cada una de las regiones representa una fase diferente.

SOLUCIÓN

Las tres fases tienen un pico de energía de alrededor de 1.5 keV = 1500 eV, que corresponde a una longitud de onda de

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10}\,\text{cm/s})}{(1500\,\text{eV})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})(10^{-8}\,\text{cm/Å})} = 8.283\text{Å}$$

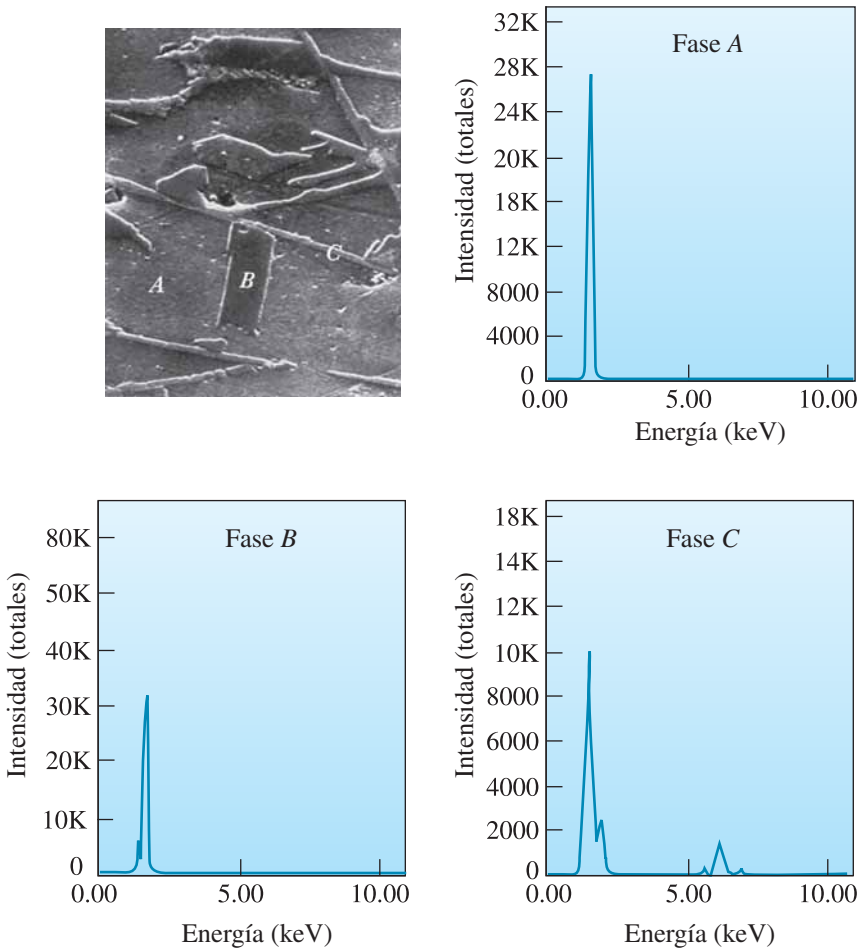


Figura 21-13 Microfotografía de microscopio electrónico de un material de fase múltiple. Se muestran las distribuciones de la energía de radiación emitida desde las tres fases marcadas *A*, *B* y *C*. La identidad de cada fase está determinada en el ejemplo 21-8. (*Reproducida por cortesía de Don Askeland.*)

Fase	Energía pico	λ	λ (tabla 21-2)	Línea
A	1.5 kcV	8.283 Å	8.337 Å	K_αAl
B	1.5 kcV	8.283 Å	8.337 Å	K_αAl
	1.7 kcV	7.308 Å	7.125 Å	K_αSi
C	1.5 kcV	8.283 Å	8.337 Å	K_αAl
	1.7 kcV	7.308 Å	7.125 Å	K_αSi
	5.8 kcV	2.142 Å	2.104 Å	K_αMn
	6.4 kcV	1.941 Å	1.937 Å	K_αFe
	7.1 kcV	1.750 Å	1.757 Å	K_βFe

De modo similar, se pueden determinar las energías y longitudes de onda de los demás picos. Estas longitudes de onda se comparan con las de la tabla 21-2, y se puede determinar la identidad de los elementos de cada una de las fases, como se resume en la siguiente tabla.

Entonces, la fase *A* parece ser una matriz de aluminio, la fase *B* parece ser una aguja de silicio (que contiene quizá un poco de aluminio) y la fase *C* parece ser un compuesto de Al-Si-Mn-Fe. En realidad, ésta es una aleación de aluminio y silicio. Las fases estables son aluminio y silicio, formándose inclusiones debido a la presencia de impurezas de manganeso y hierro.

Luminiscencia. Interacciones de las capas electrónicas externas

Si bien los rayos X se producen por las transiciones de electrones en los niveles inferiores de energía de un átomo, la **luminiscencia** es la conversión de radiaciones y otras formas de energía en luz visible. La luminiscencia se presenta cuando la radiación incidente excita electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. Los electrones excitados permanecen sólo brevemente en los niveles superiores de energía. Cuando los electrones regresan a la banda de valencia, se emiten fotones. Si la longitud de onda de estos fotones está en la escala de luz visible, ocurre luminiscencia.

La luminiscencia no se presenta en metales. Los electrones simplemente son excitados a niveles de energía superiores dentro de la banda de valencia no ocupada por completo. Cuando los electrones excitados vuelven al nivel inferior de energía, el fotón que se produce tiene una energía muy pequeña y una longitud de onda más larga que la de la luz visible [figura 21-14*a*)].

No obstante, en ciertos materiales cerámicos y semiconductores, la brecha de energía entre las bandas de valencia y de conducción es tal, que un electrón que pase por la misma producirá un fotón en la escala visible. Se observan dos efectos diferentes en estos materiales luminiscentes: fluorescencia y fosforescencia. En la **fluorescencia**, todos los electrones excitados vuelven a la banda de valencia, emitiendo los fotones correspondientes en un tiempo muy corto ($\sim 10^{-8}$ segundos) después de retirar el estímulo [figura 21-14*b*)]. Predomina una longitud de onda correspondiente a la brecha de energía E_g. En numerosas técnicas avanzadas en bioquímica e ingeniería biomédica se utilizan tinturas fluorescentes y microscopia. Para el análisis químico de materiales hay un uso generalizado de la fluorescencia de rayos X (XRF).

Los materiales **fosforescentes** contienen impurezas que introducen un nivel de donante en la brecha de energía [figura 21-14*c*)]. Los electrones excitados bajan primero al nivel de donante y quedan atrapados. Los electrones deben entonces escapar de la trampa antes de volver a la banda de valencia. Existe un retraso antes de que se emitan los fotones. Cuando se elimina la fuente, los electrones de las trampas se escapan de forma gradual y emiten luz durante un tiempo adicional. La intensidad de la luminiscencia está dada por

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{t}{\tau} \tag{21-16}$$

donde τ es el **tiempo de relajación**, que es una constante para el material. Después del tiempo t posterior a la eliminación de la fuente, la intensidad de la luminiscencia se reduce de I_0 a I.

Los materiales fosforescentes son muy importantes en la operación de pantallas de televisores. En este caso, el tiempo de relajación no debe ser muy largo porque de lo contrario las imágenes comienzan a traslaparse. En la televisión a color se usan tres tipos de materiales fosforescentes; las brechas de energía están diseñadas de modo que se producen colores rojo, verde y azul. Las pantallas de osciloscopios y de radar se basan en el mismo principio. Las lámparas fluorescentes contienen vapor de mercurio. Éste, en presencia de un arco eléctrico, fluoresce y emite luz ultravioleta. El interior del vidrio de estas lámparas está recubierto con un material fosforescente. La función de este material es convertir la radiación ultravioleta de longitud de onda pequeña en luz visible. Los tiempos de relajación van de 5×10^{-9} segundos a unos 2 segundos. El siguiente ejemplo ilustra la selección de un fósforo para una pantalla de televisión.

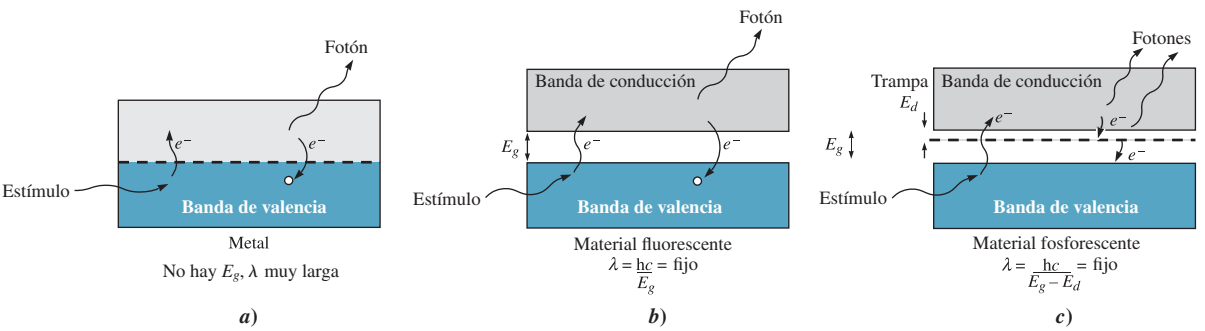


Figura 21-14 Ocurre luminiscencia cuando los fotones tienen una longitud de onda en el espectro visible. *a*) En metales no hay brecha de energía, por lo que no hay luminiscencia. *b*) Puede presentarse fluorescencia si hay brecha de energía. *c*) Hay fosforescencia cuando los fotones son emitidos en un periodo debido a trampas de donantes en la brecha de energía.

Ejemplo 21-9 *Diseño y selección de materiales para una pantalla de televisión*

Seleccione un material fosforescente que produzca una imagen azul en una pantalla de televisión.

SOLUCIÓN

Los fotones con energías que correspondan al color azul tienen longitudes de onda de unos 4.5×10^{-5} cm (figura 21-1). Por lo tanto, la energía de los fotones emitidos es

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\,\text{J} \cdot \text{s})(3 \times 10^{10}\,\text{cm/s})}{(4.5 \times 10^{-5}\,\text{cm})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} = 2.76\,\text{eV}$$

La figura 21-1 incluye brechas de energía para varios materiales. Ninguno de los materiales de esa lista tiene una E_g de 2.76 eV, pero el ZnS tiene una E_g de 3.54 eV. Si se introduce un contaminante apropiado para dar una trampa de $3.54 - 2.76 = 0.78$ eV debajo de la banda de conducción, se presentará fosforescencia o se verán fotones con energías que corresponden al color azul.

También sería necesaria información respecto al tiempo de relajación, para asegurar que la fosforescencia no persista lo suficiente para distorsionar la imagen. Los materiales fosforescentes comunes para pantallas de televisión podrían incluir el $CaWO_4$, que produce fotones con longitud de onda de 4.3×10^{-5} cm (azul). Este material tiene un tiempo de relajación de 5.1×10^{-5} cm (verde), mientras que el $Zn_3(PO_4)^2$ contaminado con manganeso produce fotones con longitud de onda de 6.45×10^{-5} cm (rojo).

Diodos emisores de luz. Electroluminiscencia

La luminiscencia se puede usar con ventajas para crear **diodos emisores de luz** (LED). Los LED se emplean para carátulas de relojes de pulso, de mesa, pantallas de calculadoras y otros aparatos electrónicos. El estímulo para estos dispositivos es un voltaje aplicado externamente, que produce transiciones electrónicas y **electroluminiscencia**. Los LED son dispositivos de unión *p-n* diseñados para que la E_g se encuentre en el espectro visible (con frecuencia, rojo). Un voltaje aplicado al diodo en polarización directa hace que orificios y electrones se recombinen en la unión y emitan fotones (figura 21-15). El GaAs, GaP, GaAlAs y GaAsP son materiales típicos para los LED.

Láseres. Amplificación de luminiscencia

El **láser** (*l*ight *a*mplification by *s*timulated *e*mission of *r*adiation) es otro ejemplo de una amplificación especial de luminiscencia. En ciertos materiales, los electrones excitados por un estímulo producen fotones que, a su vez, excitan fotones adicionales de idéntica longitud de onda. En consecuencia, se presenta una gran amplificación de los fotones emitidos en el material. Por medio de una selección apropiada del estimulante y del material, la longitud de onda de los fotones puede resultar en la escala visible. La salida del láser es un haz de fotones paralelos de la misma longitud de onda y, por lo tanto, son coherentes. En un haz *coherente* la naturaleza ondulatoria de los fotones está en fase, por lo que no ocurre interferencia destructiva. Los láseres son útiles en el tratamiento térmico y en la fusión de metales, en soldadura, en cirugías, así como en la transmisión y procesamiento de información. También son útiles en una amplia variedad de otras aplicaciones, entre las que se cuenta la lectura de discos compactos y de DVD.

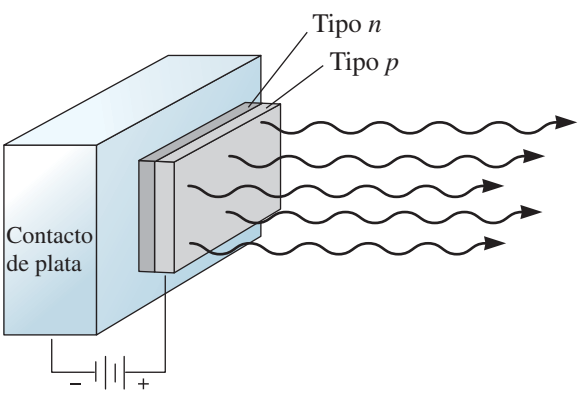


Figura 21-15 Diagrama de un diodo emisor de luz (LED). Un voltaje de polarización directa aplicado en paralelo a la unión *p-n* produce fotones.

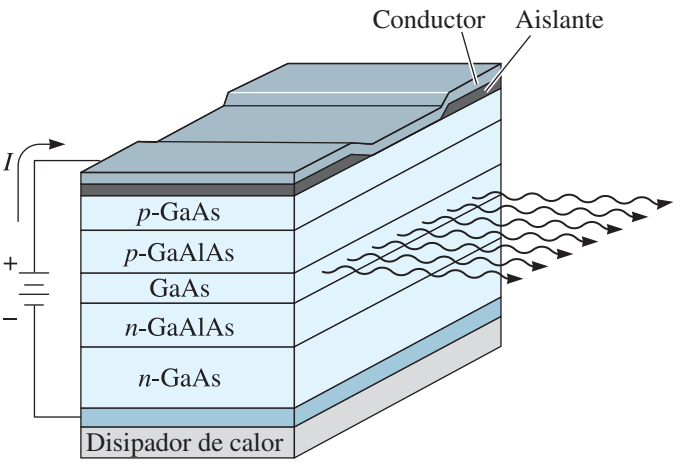


Figura 21-16 Sección en corte de un láser de GaAs. Como las capas circundantes tipo *p* y tipo *n* de GaAlAs tienen una brecha superior de energía y un índice inferior de refracción al del GaAs, los fotones quedan atrapados en la capa activa del GaAs.

La tecnología de Blue-ray^{MR} ha hecho posible comercializar los DVD de alta resolución. La longitud de onda más corta de la luz azul-violeta de un láser puede leer huecos más pequeños que codifican la información digital que la luz de longitud de onda más larga. Esto ha permitido un incremento de casi seis veces en capacidad de almacenamiento de información, en comparación con los DVD convencionales, con lo cual es posible ver una película de alta definición de dos horas en un solo disco.

Se emplean varios tipos de materiales para producir el láser. El rubí, que es un solo cristal de Al_2O_3 contaminado (dopado) con una pequeña cantidad de Cr_2O_3 (emite a 6943 Å) y el granate de aluminio e itrio ($Y_3Al_5O_{12}$ YAG) contaminado con neodimio (Nd) (emite a 1.06 μm) son dos láseres comunes de estado sólido. Otros láseres son a base de gas CO_2.

También se usan láseres semiconductores, como los basados en soluciones sólidas de GaAs, que tienen una brecha de energía correspondiente a una longitud de onda en la escala visible (figura 21-16).

Emisión térmica

Cuando se calienta un material, los electrones se excitan térmicamente a niveles superiores de energía, en particular en los niveles de energía externos, donde los electrones están menos unidos al núcleo. Los electrones vuelven de inmediato a sus niveles normales y emiten fotones, lo cual se conoce como **emisión térmica**.

A medida que aumenta la temperatura, se incrementa la agitación térmica y aumenta la máxima energía de los fotones emitidos. Se emite un espectro de radiación continuo, con una longitud de onda mínima y una distribución de intensidad dependiente de la temperatura. Los fotones pueden

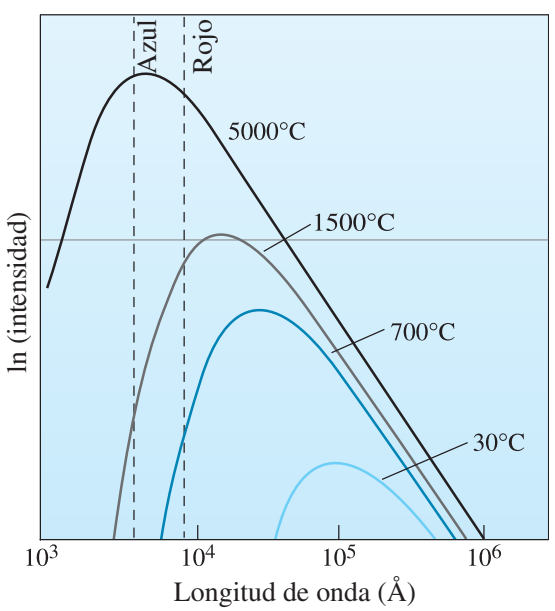


Figura 21-17 Intensidad en relación con las longitudes de onda de los fotones emitidos térmicamente desde un material. Cuando aumenta la temperatura, se emiten más fotones del espectro visible.

incluir longitudes de onda del espectro visible; en consecuencia, el color del material cambia con la temperatura. A temperaturas bajas, los fotones emitidos tienen longitudes de onda más cortas. A 700°C, comienza a verse un tinte rojizo; a 1500°C, se emiten longitudes de onda anaranjadas y rojas (figura 21-17). Temperaturas más altas producen todas las longitudes de onda de la escala visible, y el espectro emitido es luz blanca. Al medir con un pirómetro la intensidad de una banda angosta de las longitudes emitidas, se puede estimar la temperatura del material.

21-5 Sistemas de comunicaciones por fibra óptica

En 1880 Alexander Graham Bell inventó un sistema de comunicaciones basado en la luz, conocido como fotófono, y a William Wheeler se le otorgó una patente (U.S. Patente 247,229) en 1881 por un sistema que usaba tubos para iluminar habitaciones distantes. Estos dos inventos fueron los predecesores de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica que existen en la actualidad. El otro invento clave que ayudó a comercializar las tecnologías de fibra óptica fue el del rayo láser en 1960. El láser hizo posible una fuente monocromática de luz para que la fibra óptica pudiera usarse con eficiencia. Otro avance llegó cuando se pusieron al alcance del público las fibras de alta pureza de vidrio de sílice. Estas fibras permiten que haya muy pocas pérdidas ópticas y son esenciales para llevar información a distancias más grandes sin necesidad de equipo de repetición de señal. Las fibras ópticas también están libres de interferencia electromagnética (EMI) porque llevan señales como luz, no como ondas de radio.

Un sistema de fibras ópticas transmite una señal de luz generada desde alguna otra fuente, por ejemplo una señal eléctrica. El sistema de fibra óptica transmite la luz a un receptor usando una fibra óptica, procesa la información recibida y la convierte en una forma útil. Se requiere de materiales fotónicos para este proceso. Casi todos los principios y materiales que en la actualidad se emplean en sistemas fotónicos ya han sido introducidos en secciones anteriores.

Resumen

- Las propiedades ópticas de los materiales incluyen el índice de refracción, el coeficiente de absorción y la dispersión. Éstos se determinan por la interacción de la radiación electromagnética, es decir, de los fotones con los materiales. El índice de refracción de los materiales depende principalmente de la extensión de la polarización electrónica y, por lo tanto, está relacionado con la constante dieléctrica de alta frecuencia de los materiales.
- Como consecuencia de la interacción entre la luz y los materiales, puede ocurrir refracción, reflexión, transmisión, dispersión y difracción. Estos fenómenos se utilizan en una amplia diversidad de aplicaciones de los materiales fotónicos. Entre estas aplicaciones se cuentan las fibras ópticas para comunicaciones y los rayos láser para cirugía y soldadura. Los dispositivos que utilizan efectos optoelectrónicos son los LED, las celdas solares, los fotodiodos. Otras aplicaciones son fósforos para luces fluorescentes, televisores y numerosas técnicas de análisis.
- La emisión de los fotones se presenta por transiciones electrónicas o desintegración nuclear dentro de un átomo. Ejemplos de luminiscencia son la fluorescencia, la fosforescencia, la electroluminiscencia (que se utiliza en los diodos emisores de luz) y los rayos láser. Los fotones se emiten mediante excitación térmica, la cual produce fotones en la parte visible del espectro cuando la temperatura es suficientemente alta. En los análisis EDXA y XRF se aprovechan las emisiones de rayos X provenientes de los materiales.

Glosario

Celda solar Dispositivo de unión *p-n* que crea un voltaje debido a la excitación de los fotones.

Coeficiente de absorción lineal Describe la capacidad de un material para absorber radiación.

Diodos emisores de luz Dispositivos electrónicos de unión *p-n* que convierten una señal eléctrica en luz visible.

Dispersión Dependencia del índice de refracción en la frecuencia.

Electroluminiscencia Uso de una señal eléctrica aplicada para estimular la emisión de fotones de un material.

Emisión térmica Emisiones de fotones provenientes de un material debidas a la excitación de éste por el calor.

Espectro característico Espectro de radiación emitido por un material. Muestra picos a longitudes de onda fijas que corresponden a transiciones electrónicas dentro de un átomo. Todo elemento tiene un espectro característico único.

Espectro continuo Radiación emitida por un material con todas las longitudes de onda más largas que un límite crítico de longitud de onda corta.

Fluorescencia Emisión de luz que normalmente se obtiene en menos de $\sim 10^{-8}$ segundos.

Fosforescencia Emisión de radiaciones proveniente de un material después de haberse eliminado el estímulo.

Fotoconducción Producción de un voltaje debido a la estimulación de electrones hacia la banda de conducción, impulsados por una radiación.

Fotones Energía o radiación producida por fuentes atómicas, nucleares o electrónicas y que pueden ser tratadas como partículas o como ondas.

Índice de refracción Se relaciona con el cambio en velocidad y dirección de propagación de la radiación, al pasar esta radiación por un medio transparente (también conocido como índice refractivo).

Índice refractivo Vea Índice de refracción.

Láser El acrónimo significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiaciones. Es un haz de radiación coherente monocromática producida por la emisión controlada de fotones.

Límite de longitud de onda corta Es la longitud de onda más corta o radiación más alta de energía desde un material bajo condiciones especiales.

Luminiscencia Conversión de radiaciones en luz visible.

Margen de absorción Longitud de onda a la cual cambian de manera abrupta las características de absorción de un material.

Rayos X Radiación electromagnética en la escala de longitudes de onda $\sim$0.1 a 100 Å.

Reflectividad Porcentaje de la radiación incidente que se refleja.

Tiempo de relajación Tiempo requerido para que 1/e de los electrones baje de la banda de conducción a la banda de valencias en la luminiscencia.

Problemas

Sección 21-1 El espectro electromagnético

Sección 21-2 Refracción, reflexión, absorción y transmisión

21-1 Exprese las definiciones de índice de refracción y de coeficiente de absorción. Compárelas con las definiciones de constante dieléctrica, factor de pérdida, módulo de Young y deformación viscosa.

21-2 ¿Qué es la ley de Snell? Ilustre mediante un diagrama.

21-3 ¿De qué depende el índice de refracción de un material?

21-4 ¿Qué es un "cristal de plomo"? ¿Qué hace que el índice de refracción de este material sea mucho más alto que el del vidrio de silicato común?

21-5 ¿Qué mecanismo de polarización afecta al índice de refracción?

21-6 ¿Por qué es menor el índice de refracción del hielo que el del agua?

21-7 ¿Qué es dispersión? ¿Cuál es la importancia de la dispersión en los sistemas de fibra óptica?

21-8 ¿Cuáles son los factores que limitan la transmisión de luz a través de materiales dieléctricos?

21-9 ¿Cuál es el principio de operación de los LED y de las celdas solares?

21-10 Escriba la fórmula de la longitud de onda como función de la frecuencia y encuentre la frecuencia de un fotón de 560 nm.

21-11 ¿Qué material tiene una longitud de onda aproximada de 0.5 μm? ¿De 0.88 μm? ¿Cuál es la energía de la brecha de banda del sulfato de plomo?

21-12 Encuentre la velocidad de la luz a través del cuarzo. Si la luz tiene una longitud de onda de 5890 A en el vacío, ¿cuál será su longitud de onda en el cuarzo?

21-13 Un rayo de fotones incide sobre un material a un ángulo de 25° con respecto a la normal de la superficie. ¿Cuáles de los materiales de la lista de la tabla 21-1, si hay alguno, podría hacer que el rayo de fotones avance en un ángulo de 18 a 20° con respecto a la normal de la superficie del material?

21-14 Un rayo láser que pasa por el aire incide sobre un bloque de poliestireno de 5 cm de espesor a

un ángulo de 20° con respecto a la normal del bloque. ¿Qué distancia cambiará de lugar el rayo con respecto a su trayectoria original cuando alcance el lado opuesto del bloque?

21-15 Un cable de fibra óptica de 6000 km se tiende para conectar las ciudades de Nueva York y Londres. Si el núcleo del cable tiene un índice refractivo de 1.48 y el revestimiento un índice refractivo de 1.45, ¿cuál es el tiempo necesario para que un haz de fotones introducido a 0° en Nueva York llegue a Londres? Suponga que los efectos de dispersión pueden ser insignificantes para este cálculo. ¿Cuál es el máximo ángulo de incidencia al cual no hay fuga de luz desde el núcleo?

21-16 Un bloque de vidrio de 10 cm de grueso con $n = 1.5$ transmite 90% de la luz que incide sobre él. Determine el coeficiente de absorción lineal (α) para este material. Si este bloque se coloca en agua, ¿qué parte de la luz incidente será transmitida a través del bloque?

21-17 Un haz de fotones pasa por el aire e incide sobre un vidrio de sosa y cal que es parte de un acuario que contiene agua. ¿Qué parte del haz es reflejado por la cara anterior del vidrio? ¿Qué parte del haz restante es reflejado por la cara posterior del vidrio?

21-18 Se encuentra que 20% de la intensidad original de un haz de fotones se transmite desde el aire a través de un material de 1 cm de grueso, con una constante dieléctrica de 2.3, y luego regresa al aire. Determine la fracción del haz que
a) es reflejado en la superficie anterior,
b) es absorbido en el material y
c) es reflejado en la superficie posterior.
Determine el coeficiente de absorción lineal de los fotones en el material.

21-19 Un haz de fotones en el aire incide sobre un material compuesto, formado por una hoja de 1 cm de grueso de polietileno y una hoja de 2 cm de grueso de vidrio de cal y sosa. El haz incidente forma un ángulo de 10° con la normal del material compuesto. Determine el ángulo del haz con respecto a la normal del compuesto cuando
a) pasa por el polietileno,
b) pasa por el vidrio y
c) pasa por aire en el lado opuesto del compuesto.
¿Qué distancia se habrá desplazado el haz de su trayectoria original cuando emerge del lado opuesto del material compuesto?

21-20 Una fibra de vidrio ($n = 1.5$) está recubierta con teflón. Calcule el ángulo máximo que se puede desviar un haz de luz, en relación con el eje de la fibra, sin escapar de la parte interna de la fibra.

21-21 ¿Cuál es la reflectividad de un haz de luz en el agua que se refleja sobre una esfera de germanio pulido?

21-22 ¿Cuál es el coeficiente lineal de absorción de un prisma de 10 cm de grosor que reduce 25% la intensidad de la luz?

21-23 Un material tiene un coeficiente de absorción lineal de 591 cm^{-1} para fotones de una longitud de onda determinada. Determine el espesor del material necesario para absorber el 99.9% de los fotones.

21-24 Grafique K_α como función del límite de absorción y observe si existe alguna tendencia probable (vea la tabla 21-2). Explique las tendencias que encuentre.

Sección 21-3 Absorción, transmisión o reflexión selectivas

21-25 ¿Qué es un vidrio fotocromático?

21-26 ¿Cómo se producen los vidrios de color?

21-27 ¿De qué está hecho el cristal de rubí?

Sección 21-4 Ejemplos y usos de fenómenos de emisión

21-28 ¿Cuál es el principio de operación del análisis por dispersión de energía de rayos X (EDXA)?

21-29 ¿Qué es fluorescencia? ¿Qué es fosforescencia?

21-30 ¿Qué significa XRF?

21-31 ¿Cómo funciona una lámpara fluorescente?

21-32 ¿Qué es electroluminiscencia?

21-33 Un microscopio electrónico de barrido tiene tres posiciones para el voltaje de aceleración *a*) 5 keV, *b*) 10 keV y *c*) 20 keV. Determine la posición de barrido mínimo necesario para producir K_α picos para los materiales citados en la tabla 21-2.

21-34 Un material fosforescente tiene un tiempo de relajación de 75 s. ¿Cuál será su intensidad después de 75 s exactos de eliminar su fuente de energía?

21-35 El tiempo de relajación de un fósforo empleado para una pantalla de TV es de 5×10^{-2} segundos. Si la frecuencia de regeneración de la imagen es de 60 Hz, entonces ¿cuál es la reducción en intensidad de la luminiscencia antes que se restablezca al 100% por la regeneración?

21-36 El tungstato de calcio ($CaWO_4$) tiene un tiempo de relajación de 4×10^{-6} s. Determine el tiempo necesario para que la intensidad de este material fosforescente disminuya a 1% de la intensidad original, después de eliminar el estímulo.

21-37 La intensidad de la radiación proveniente de un material fosforescente disminuye a 90% de su intensidad original después de 1.95×10^{-7} segundos. Determine el tiempo necesario para que

la intensidad se reduzca a 1% de su intensidad original.

21-38 Un material de fósforo con una brecha de banda de 3.5 eV, con grado apropiado de impurificación, se usará para producir colores azul (475 nm) y verde (510 nm). Determine el nivel de energía de las trampas donadoras con respecto a la banda de conducción en cada caso.

21-39 ¿Qué es un láser?

21-40 Determine la longitud de onda de los fotones que se producen cuando los electrones excitados hacia la banda de conducción del silicio contaminado con indio:
a) bajan de la banda de conducción hacia la banda del aceptante y
b) después bajan de la banda del aceptante hasta la banda de valencia (vea el capítulo 19).

21-41 ¿Cuáles, si los hay, de los materiales semiconductores compuestos, de la lista de los capítulos 19 y 21, son capaces de producir un rayo láser infrarrojo?

21-42 ¿Qué tipo de radiación electromagnética (ultravioleta, infrarroja, visible) se produce cuando un electrón se recombina con un orificio en germanio puro y cuál es su longitud de onda?

21-43 ¿Cuáles, si los hay, de los materiales dieléctricos citados en el capítulo 19, reducirían la velocidad de la luz en aire de 3×10^{10} cm/s a menos de 0.5×10^{10} cm/s?

21-44 ¿Qué material filtrante utilizaría usted para aislar el pico K_α de los siguientes rayos X: hierro, manganeso o níquel? Explique su respuesta.

21-45 ¿Qué voltaje debe ser aplicado a un filamento de tungsteno para producir un espectro continuo de rayos X con una longitud de onda mínima de 0.09 nm?

21-46 Un filamento de tungsteno es calentado por una fuente de alimentación de 12,400 V. ¿Cuál es
a) la longitud de onda y
b) la frecuencia de los rayos X de más alta energía que se producen?

21-47 ¿Cuál es el voltaje mínimo acelerador necesario para producir rayos X K_α en níquel?

21-48 Con base en los rayos X característicos emitidos, determine la diferencia en energía entre los electrones en el tungsteno para *a*) las capas K y L
b) las capas K y M y
c) las capas L y M.

21-48 La figura 21-18 muestra los resultados de un análisis de rayos X fluorescentes, en el que la energía de los rayos X emitidos por el material se trazan en función de sus longitudes de onda. Determine
a) el voltaje acelerador empleado para producir los rayos X de excitación y
b) la identidad de los elementos de la muestra.

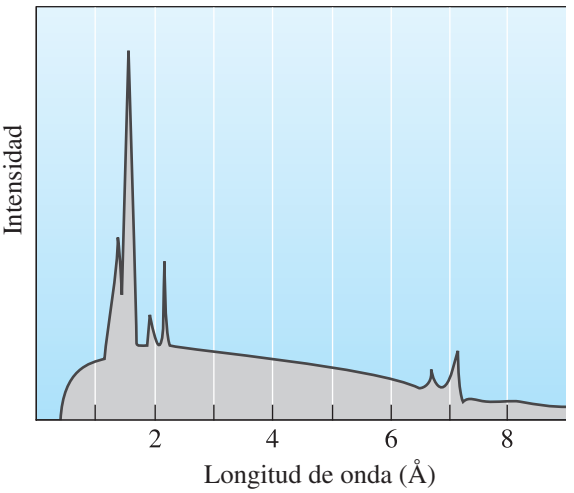


Figura 21-18 Resultados de un análisis por fluorescencia de rayos X de una muestra de un metal desconocido (para el problema 21-49)

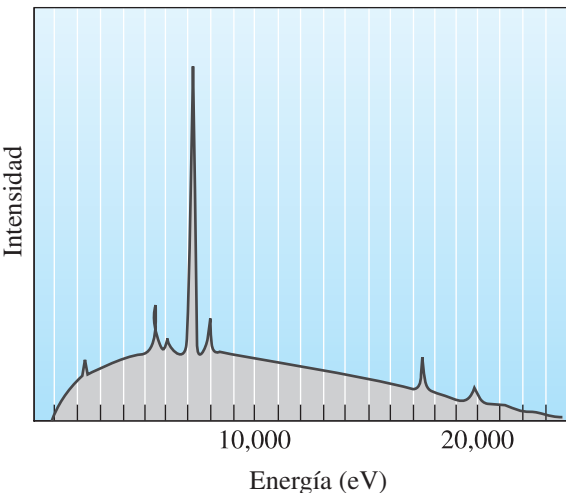


Figura 21-19 Espectro de emisión de rayos X (para el problema 21-50).

21-50 La figura 21-19 muestra la intensidad como función de energía de rayos X, producidos por un análisis dispersivo de energía de un espécimen en un microscopio electrónico de barrido. Determine la intensidad de los elementos de la muestra.

21-51 Revise la figura 21-17. Suponga que el material se está enfriando lentamente de 5000°C a cero absoluto. ¿Qué longitud de onda de fotones se generará antes de que el objeto deje de emitir luz?

Sección 21-5 Sistemas de comunicaciones por fibra óptica

21-52 ¿Cuál es el principio por el cual se transmite la información por fibra óptica?

21-53 ¿Cuál es el material que se usa para la fabricación de la mayor parte de las fibras ópticas? ¿De qué material es el recubrimiento? ¿Qué material

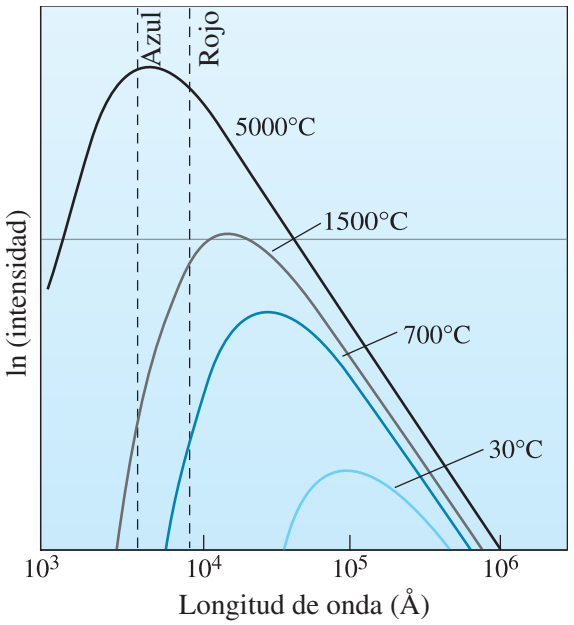


Figura 21-17 Intensidad en relación con las longitudes de onda de los fotones emitidos térmicamente desde un material. Cuando aumenta la temperatura, se emiten más fotones del espectro visible. (Repetida para el problema 21-51.)

se usa para mejorar el índice refractivo del núcleo?

Problemas de diseño

21-54 Se han de generar rayos X de níquel dentro de un recipiente, con los rayos X emitidos desde el recipiente a través de sólo una ranura. Diseñe un recipiente que asegure que no más de 0.01% de la emisión de rayos X del níquel K_α escapen por el resto de las paredes del recipiente, pero que 95% de los rayos X del níquel K_α pasen por una delgada ventana que cubra la ranura. Los siguientes datos proporcionan los coeficientes de absorción de masa de varios metales, para rayos X del níquel K_α. El coeficiente de absorción de masa α_m es α/ρ, donde α es el coeficiente de absorción lineal de masa y ρ es la densidad del material filtrante.

Material	α_m (cm^2/g)
Be	1.8
Al	58.4
Ti	247.0
Fe	354.0
Co	54.4
Cu	65.0
Sn	322.0
Ta	200.0
Pb	294.0

21-55 Diseñe un método mediante el cual se pueda usar un material fotoconductor, para medir la temperatura de un material, partiendo de la emisión térmica del material.

21-56 Diseñe un método, basado en las características refractivas de un material, que harán que un haz de fotones originalmente a un ángulo de 2° con respecto a la normal del material, se desplace 2 cm de su trayectoria original a una distancia de 50 cm del material.

Problemas por computadora

21-57 *Cálculo de la potencia en decibeles.* En un sistema óptico de comunicaciones, o en un sistema de transmisión de energía eléctrica, la energía o señal se transfiere con frecuencia entre varios componentes. El decibel (dB) es una unidad práctica para medir los niveles relativos de la potencia. Si la potencia de entrada a un dispositivo es P_1 y la potencia de salida es P_2, entonces P_2/P_1 es la relación de potencia transmitida y representa la eficiencia. Esta relación en decibeles se escribe como

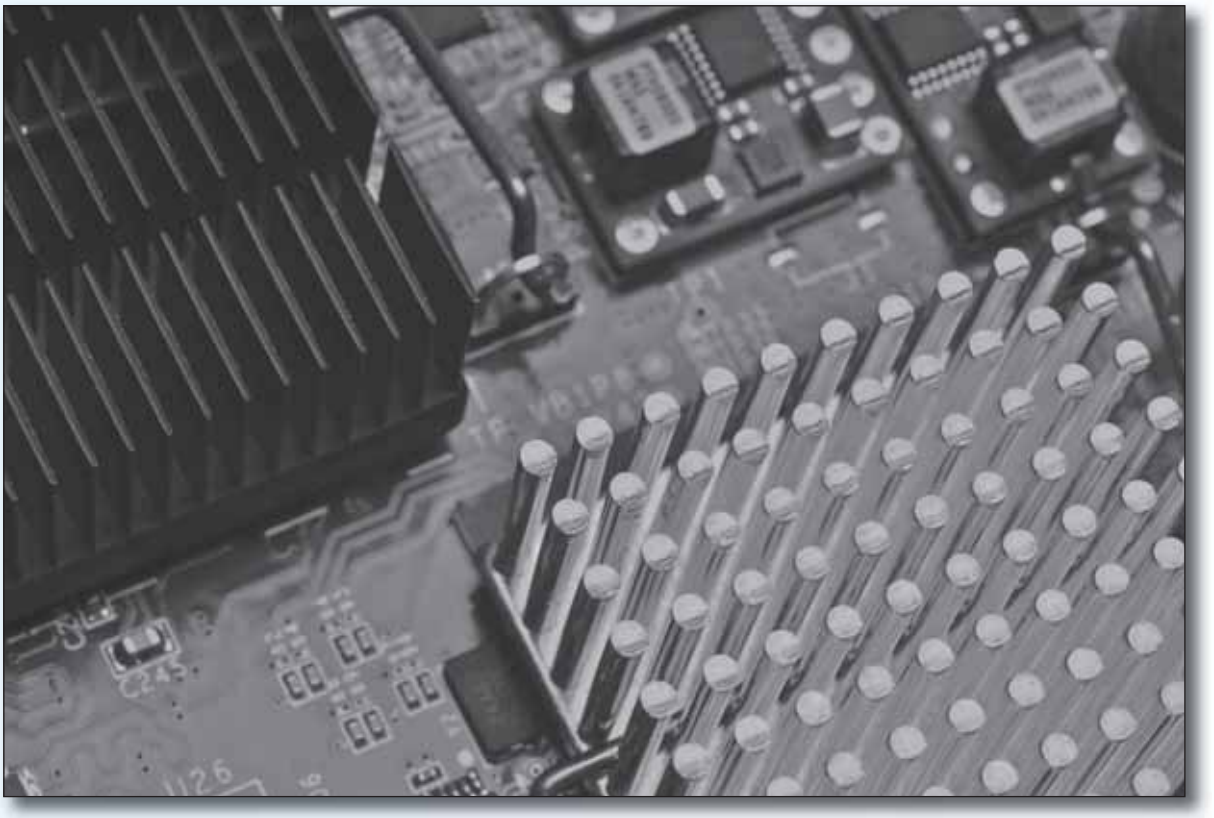
$$\text{dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

La potencia debe expresarse en unidades similares. Edite un programa de cómputo que calcule el valor en dB para la transmisión de energía entre dos componentes de un sistema de fibra óptica (por ejemplo, de la fuente luminosa a la fibra). Después amplíe este cálculo para tres componentes (por ejemplo luz transmitida de la fuente a la fibra y después de la fibra a un detector).

Problemas Knovel[MR]

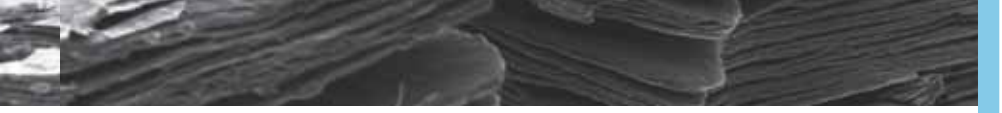
K21-1 Un rayo de luz pasa por benceno a vidrio (dióxido de silicio). El ángulo de incidencia de la luz es de 30°. ¿Cuál es el ángulo de la luz refractada?

K21-2 Calcule la reflectividad del mercurio en aire a partir del índice de refracción n.



Las propiedades térmicas de los materiales desempeñan una muy importante función en numerosas tecnologías. Algunas aplicaciones requieren materiales que reduzcan al mínimo la transferencia de calor, mientras que otras requieren que se transporte de forma eficiente el calor. Los revestimientos de barrera térmica se aplican a la superficie de los álabes de turbinas (que se deslizan) para minimizar su exposición a las altas temperaturas de los motores de las aeronaves. Los refractarios son materiales cerámicos que se usan para contener metales fundidos durante el colado. La densidad de potencia y la generación de calor aumentan a medida que los transistores y otros dispositivos electrónicos en los microchips se hacen más pequeños y numerosos para mejorar el desempeño de los equipos, por lo que la gestión térmica del calor residual se ha vuelto cada vez más importante. La imagen de arriba muestra dos tipos de aletas de refrigeración que eliminan el calor de un paquete electrónico y le permiten funcionar más eficientemente.

La expansión térmica de materiales también desempeña un papel clave en muchas situaciones; esta expansión puede llevar a que se produzcan esfuerzos que conducen a fallas de los materiales. Científicos e ingenieros especialistas en materiales han creado novedosas clases de éstos que tienen un coeficiente de expansión térmica negativo o casi cero. Esta es una característica importante en materiales ópticos, como los que se usan en espejos para telescopios, porque el enfoque de los espejos cambia según la expansión y contracción térmicas. (*Lisa J. Goodman/ Photographer's Choice/Getty Images.*)



CAPÍTULO

22

Propiedades térmicas de los materiales

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Cuál material tiene la conductividad térmica más alta?*
- *¿Existen materiales que tienen coeficientes de expansión térmica cero o negativa?*
- *¿Qué causa que una fuente de vidrio para hornear se rompa cuando se enfría demasiado rápido después de retirarse del horno?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Definir la capacidad calórica y el calor específico.
- Comprender el proceso de transportación del calor a través de los materiales.
- Utilizar los coeficientes de expansión térmica para calcular los cambios dimensionales que sufren los materiales al calentarse o enfriarse.
- Calcular el flujo de calor que se presenta en un material por un gradiente de temperatura.
- Comprender la forma en que la microestructura afecta la conductividad térmica de los materiales.
- Cuantificar la resistencia al choque térmico de los materiales.

En capítulos anteriores se describió la forma en que pueden cambiar las propiedades de un material con la temperatura. En muchos casos, se encuentra que las propiedades mecánicas y físicas de un material dependen de la temperatura de servicio o de procesamiento. Es útil apreciar las propiedades térmicas de los materiales para entender la falla mecánica de los mismos cuando cambia la temperatura, a fin de diseñar procesos en los que los materiales deban calentarse o para seleccionar materiales para transferir rápidamente el calor.

El manejo térmico se ha convertido en un factor muy importante en materiales de empaques electrónicos. Algunos chips de computadora tienen ahora más de mil millones de transistores; el calor que se produce debe ser disipado de manera eficiente para que los dispositivos funcionen de forma adecuada.

En materiales metálicos, los electrones transfieren calor; en materiales cerámicos, la conducción de calor abarca ondas elásticas. En otras aplicaciones, por ejemplo los recubri-

mientos térmicos de barreras , se desea reducir al mínimo la transferencia térmica a través del material. La transferencia térmica también es importante en numerosas aplicaciones que van, por ejemplo, de vasos de espuma de poliestireno que se usan para tomar bebidas calientes hasta refinados recubrimientos en vidrios para la construcción de edificios eficientes en el consumo de energía. En este capítulo se estudiará la capacidad térmica, las propiedades de expansión térmica y la conductividad térmica de materiales.

22-1 Capacidad térmica y calor específico

En el capítulo 21 se observó que el comportamiento óptico depende de la forma en que se producen e interaccionan los fotones con un material. El fotón es tratado como partícula con una energía particular o como radiación electromagnética que tiene una longitud de onda o frecuencia particulares. Algunas de las propiedades térmicas de los materiales también pueden caracterizarse en la misma forma dual, pero estas propiedades son determinadas por el comportamiento de los **fonones**, no de los fotones.

En el cero absoluto, los átomos en un material tienen una mínima energía. Cuando se les aplica calor, los átomos ganan energía térmica y vibran a una amplitud y frecuencia particulares. La vibración de cada átomo se transfiere a los átomos circundantes y produce una onda elástica llamada fonón. La energía E del fonón se puede expresar en términos de la longitud de onda, donde h es la constante de Planck y c la velocidad de la luz o frecuencia ν, igual que en la ecuación 21-1:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \tag{22-1}$$

La energía necesaria para variar un grado la temperatura del material es la **capacidad calorífica** o **calor específico**.

La capacidad calorífica es la energía necesaria para elevar un grado la temperatura de un mol de material. El calor específico se define como la energía necesaria para incrementar 1°C la temperatura de un gramo de un material. La capacidad calorífica se puede expresar ya sea a temperatura constante, C_p, o a un volumen constante, C_v. A temperaturas altas, la capacidad calorífica para un volumen determinado de material se aproxima a

$$C_p = 3R \simeq 6\,\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \tag{22-2}$$

donde R es la constante de los gases (1.987 cal/mol); no obstante, como se muestra en la figura 22-1, la capacidad calorífica no es una constante. La capacidad calorífica de metales se aproxima a $6\,\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ cerca de la temperatura ambiente, pero este valor no se alcanza en materiales cerámicos sino hasta que se acerca a los 1000 K.

La relación entre calor específico y capacidad calorífica es

$$\text{Calor específico} = C_p = \frac{\text{capacidad calorífica}}{\text{peso atómico}} \tag{22-3}$$

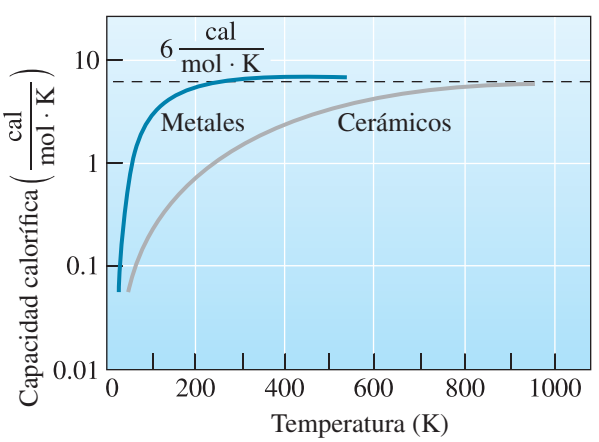


Figura 22-1 Capacidad calorífica como función de la temperatura para metales y materiales cerámicos

Tabla 22-1 Calor específico de materiales seleccionados a 300 K

Material	Calor específico $\left(\frac{cal}{g \cdot K}\right)$	Material	Calor específico $\left(\frac{cal}{g \cdot K}\right)$
Metales		**Cerámicos**	
Al	0.215	Al_2O_3	0.200
Cu	0.092	Diamante	0.124
B	0.245	SiC	0.250
Fe	0.106	Si_3N_4	0.170
Pb	0.038	SiO_2 (sílice)	0.265
Mg	0.243	**Polímeros**	
Ni	0.106	Polietileno de alta densidad	0.440
Si	0.168	Polietileno de baja densidad	0.550
Ti	0.125	Nylon 6,6	0.400
W	0.032	Poliestireno	0.280
Zn	0.093	**Otros**	
		Agua	1.000
		Nitrógeno	0.249

Nota: $1 \frac{cal}{g \cdot K} = 4184 \frac{J}{kg \cdot K}$

En la mayoría de los cálculos de ingeniería, el calor específico se usa en forma más práctica que la capacidad calorífica. El calor específico de materiales comunes se da en la tabla 22-1. Ni la capacidad calorífica ni el calor específico dependen de forma significativa de la estructura del material; por lo tanto, los cambios en densidad de las dislocaciones, el tamaño de grano o las vacancias tienen poco efecto.

El factor más importante que afecta al calor específico es el de vibraciones de la red o fonones, pero hay otros factores que afectan la capacidad calorífica. Un sorprendente ejemplo se presenta en materiales ferromagnéticos como el hierro (figura 22-2). Se observa una capacidad calorífica anormalmente alta en el hierro a la temperatura de Curie, donde los momentos magnéticos normalmente alineados de los átomos de hierro se dispersan al azar y el hierro se hace paramagnético. La capacidad calorífica también depende de la estructura cristalina, como se aprecia en la figura 22-2 para el hierro.

Los siguientes ejemplos ilustran el uso del calor específico.

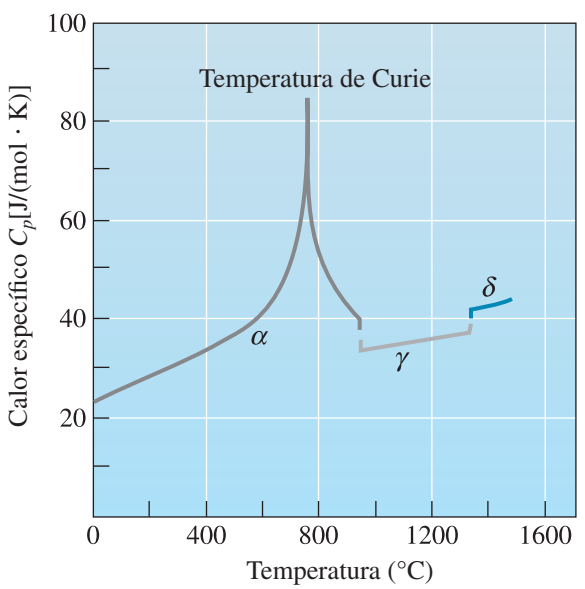


Figura 22-2 Efecto de la temperatura en el calor específico del hierro. Aparecen indicados el cambio en estructura cristalina y el cambio en comportamiento de ferromagnético a paramagnético.

Ejemplo 22-1 *Calor específico del tungsteno*

¿Cuánto calor debe aplicarse a 250 g de tungsteno para incrementar su temperatura de 25 a 650°C?

SOLUCIÓN

El calor específico del tungsteno es $0.032 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$. Entonces,

$$\begin{aligned}\text{Calor requerido} &= (\text{calor específico})(\text{masa})(\Delta T)\\ &= (0.032\ \text{cal/g} \cdot \text{K})(250\text{g})(650 - 25)\\ &= 5000\ \text{cal}\end{aligned}$$

Si no hay pérdidas, al tungsteno deben aplicarse 5000 calorías (o 20,920 J). Pueden usarse diversos procesos para calentar el metal. Se podría usar un soplete, colocar el tungsteno en una bobina de inducción para inducir corrientes parásitas, pasar una corriente eléctrica por el metal o colocar el metal en un horno calentado por resistores de SiC.

Ejemplo 22-2 *Calor específico del niobio*

Suponga que la temperatura de 50 g de niobio aumenta 75°C cuando se calienta. Estime el calor específico y determine el calor en calorías requeridas.

SOLUCIÓN

El peso atómico del niobio es de 92.91 g/mol. Se puede usar la ecuación 22-3 para estimar el calor necesario para incrementar 1°C la temperatura de un gramo:

$$C_p \approx \frac{6}{92.91} = 0.0646\,\text{cal/(g} \cdot \text{°C)}$$

Entonces, el total de calor necesario es

$$\text{Calor} = \left(0.0646 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{°C}}\right)(50\,\text{g})(75\text{°C}) = 242\ \text{cal}$$

Observe que el cambio de 1°C en temperatura es equivalente a un cambio de 1 K en la temperatura.

22-2 Expansión térmica

Un átomo que gana energía térmica y comienza a vibrar se comporta como si tuviera un radio atómico más grande; aumenta la distancia promedio entre los átomos y, por lo tanto, se incrementan las dimensiones totales del material. El cambio en dimensiones del material Δl por unidad de longitud está dado por el **coeficiente lineal de expansión térmica** α:

$$\alpha = \frac{l_f - l_0}{l_0(T_f - T_0)} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \tag{22-4}$$

donde T_0 y T_f son las temperaturas inicial y final y l_0 y l_f son las dimensiones inicial y final del material. Un coeficiente *volumétrico* de expansión térmica (α_v) también puede definirse para describir el cambio en volumen cuando se cambia la temperatura del material. Si el material es isótropo, $\alpha_v = 3\alpha$. Se usa un instrumento conocido como dilatómetro para medir el coeficiente de expansión térmica.

Tabla 22-2 Coeficiente lineal de expansión térmica, a temperatura ambiente, para materiales seleccionados

Material	Coeficiente lineal de expansión térmica (α) ($\times 10^{-6}/°C$)	Material	Coeficiente lineal de expansión térmica (α) ($\times 10^{-6}/°C$)
Al	25.0	Nylon 6,6	80.0
Cu	16.6	Nylon 6,6 -33% de fibra de vidrio	20.0
Fe	12.0	Polietileno	100.0
Ni	13.0	Polietileno -30% de fibra de vidrio	48.0
Pb	29.0	Poliestireno	70.0
Si	3.0	Al_2O_3	6.7
W	4.5	Sílice fundida	0.55
Acero 1020	12.0	ZrO_2 parcialmente estabilizada	10.6
Aleación de aluminio 3003	23.2	SiC	4.3
Fundición de hierro gris	12.0	Si_3N_4	3.3
Invar (Fe-36% Ni)	1.54	Vidrio de sosa y cal	9.0
Acero inoxidable	17.3		
Latón amarillo	18.9		
Epoxi	55.0		

También es posible determinar la expansión térmica si se usa la difracción de rayos X (XRD). En la tabla 22-2 aparecen los coeficientes de expansión térmica para varios materiales.

El coeficiente de expansión térmica de un material está relacionado con el enlace atómico. Para que los átomos vibren alrededor de sus posiciones de equilibrio, debe aplicarse energía al material. Si el pozo de potencial es asimétrico, los átomos se separan más con mayor energía en comparación con un pozo simétrico, y el material tiene un alto coeficiente de expansión térmica (capítulo 2). El coeficiente de expansión térmica también tiende a ser inversamente proporcional a la profundidad del pozo de potencial, es decir, los materiales con altas temperaturas de fusión tienen bajos coeficientes de expansión térmica (figura 22-3).

En consecuencia, el plomo tiene un coeficiente mucho mayor que los metales con alto punto de fusión, como el tungsteno. La mayoría de los materiales cerámicos, que tienen fuertes enlaces iónicos o covalentes, tienen bajos coeficientes en comparación con los metales. Ciertos vidrios, por ejemplo la sílice fundida, también tienen un bajo factor de empaquetamiento, lo que ayuda a acomodar energía térmica con poco cambio dimensional. Aun cuando el enlace dentro de las cadenas de

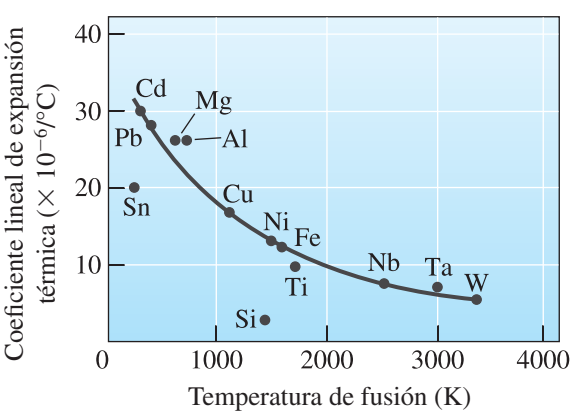


Figura 22-3 Relación entre el coeficiente lineal de expansión y la temperatura de fusión en metales a 25°C. Los metales con punto de fusión más alto tienden a expandirse en menor grado.

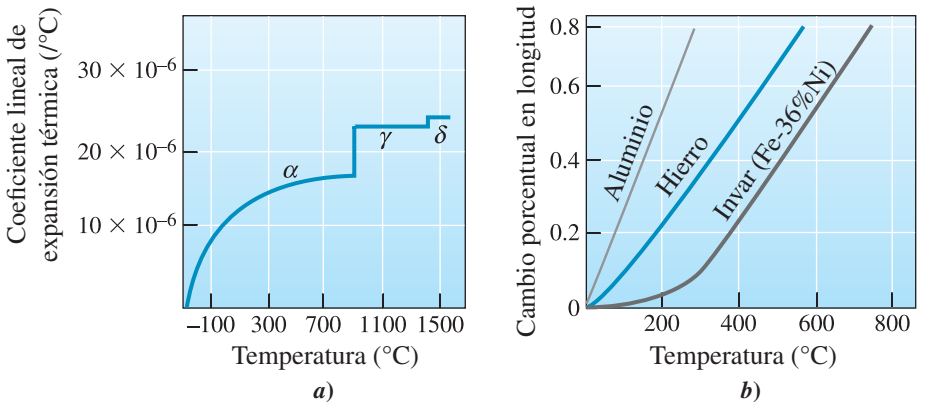


Figura 22-4 *a*) El coeficiente lineal de expansión térmica del hierro cambia abruptamente a temperaturas en las cuales se presenta una transformación alotrópica. *b*) La expansión del Invar es muy baja debido a las propiedades magnéticas del material a bajas temperaturas.

polímeros es covalente, los enlaces secundarios que mantienen juntas las cadenas son débiles, lo cual lleva a coeficientes altos. Los polímeros que contienen fuertes enlaces cruzados por lo general tienen coeficientes más bajos que los polímeros lineales como el polietileno.

Deben tomarse algunas precauciones al calcular los cambios dimensionales en los materiales:

1. Las características de expansión de algunos materiales, en particular de monocristales y de materiales con una orientación preferida, son anisótropos.
2. Los materiales alotrópicos tienen abruptos cambios en sus dimensiones cuando se presenta la transformación de fase (figura 22-4). Estos cambios abruptos contribuyen al agrietamiento de refractarios al calentarse o enfriarse y grietas de templado en aceros.
3. El coeficiente lineal de expansión cambia continuamente con la temperatura. Por lo general, α aparece en manuales como una complicada función dependiente de la temperatura, o se da como constante para sólo una escala particular de temperatura.
4. La interacción del material con campos eléctricos o magnéticos, producidos por dominios magnéticos, puede impedir la expansión normal hasta que se alcancen temperaturas superiores a la temperatura de Curie. Este es el caso del Invar, que es una aleación de Fe-36% Ni, que prácticamente no experimenta cambios dimensionales a temperaturas inferiores a la temperatura de Curie (unos 200°C). Esto hace que el Invar sea atractivo como material para materiales bimetálicos (figura 22-4).

La expansión térmica de los materiales de ingeniería se puede adaptar si se usan materiales de fases múltiples. Al calentarse, una fase puede mostrar expansión térmica, en tanto que la otra puede mostrar contracción térmica. De esta manera, el material general puede mostrar un coeficiente de expansión térmica igual a cero o negativo. El Zerodur^{MR} es un material vidrio-cerámico que puede ser controlado para que tenga una expansión térmica igual a cero o ligeramente negativa. Fue inventado por Schott Glass Technologies y está formado por una fase cristalina ~ 70 a 80 %p. El resto es una fase vítrea. El coeficiente de expansión térmica negativa de la fase vítrea y la expansión térmica positiva de la fase cristalina se cancelan, lo cual lleva a un material de expansión térmica igual a cero. El Zerodur^{MR} se ha usado como sustrato de los espejos de muchos telescopios. En estas aplicaciones se requiere un material denso, ópticamente transparente y de expansión térmica igual a cero, porque cualquier cambio en dimensiones como resultado de cambios en la temperatura en el espacio haría difícil enfocar de forma apropiada los telescopios. El Zerodur^{MR} es un ejemplo de la forma en que los materiales de ingeniería han ayudado a los astrónomos y a la sociedad a conocer galaxias lejanas. Numerosos materiales cerámicos basados en fosfato de sodio y zirconio (NZP), que tienen un coeficiente de expansión térmica casi igual a cero, también han sido perfeccionados por científicos especialistas en materiales.

Los ejemplos siguientes muestran el uso de los coeficientes lineales de expansión térmica.

Ejemplo 22-3 *Enlaces y expansión térmica*

Explique por qué, en la figura 22-3, los coeficientes lineales de expansión térmica para el silicio y el estaño no caen en la curva. ¿Cómo se esperaría que el germanio se ajustara en esta figura?

SOLUCIÓN

Tanto el silicio como el estaño tienen enlaces covalentes. Estos fuertes enlaces covalentes son más difíciles de estirar que los enlaces metálicos, de modo que estos elementos tienen un coeficiente menor. Como el germanio también está ligado de manera covalente, su expansión térmica debe ser menor que la pronosticada por la figura 22-3.

Ejemplo 22-4 *Diseño de un molde para un proceso de colado*

Diseñe las dimensiones para un modelo que se usará para producir una pieza de aluminio colada de forma rectangular que tenga dimensiones de 25 × 25 × 3 cm a 25°C.

SOLUCIÓN

Para producir una pieza colada que tenga dimensiones finales particulares, la cavidad del molde en el que el aluminio líquido se ha de vaciar debe ser de mayor tamaño. Después de que el líquido se solidifica, lo cual ocurre a 660°C para el aluminio puro, la pieza colada sólida se contrae a medida que se enfría a temperatura ambiente. Si se calcula la cantidad de contracción esperada, es posible fabricar el molde original para producir la cavidad del molde con el tamaño más grande requerido.

El coeficiente lineal de expansión térmica para el aluminio es $25 \times 10^{6^\circ}\text{C}^{-1}$. El cambio de temperatura desde la temperatura de solidificación a 25°C es 660 − 25 = 635°C. El cambio en cualquier dimensión está dado por

$$\Delta l = l_0 - l_f = \alpha l_0 \Delta T$$

Para las dimensiones de 25 cm, l_f =25 cm. Se desea determinar l_0:

$$\begin{aligned} l_0 - 25 &= (25 \times 10^{-6})(l_0)(635) \\ l_0 - 25 &= 0.015875\, l_0 \\ 0.984 l_0 &= 25 \\ l_0 &= 25.40 \text{ cm} \end{aligned}$$

Para la dimensión de 3 cm, l_f = 3 cm,

$$\begin{aligned} l_0 - 3 &= (25 \times 10^{-6})(l_0)(365) \\ l_0 - 3 &= 0.015875 l_0 \\ 0.984\, l_0 &= 3 \\ l_0 &= 3.05 \text{ cm} \end{aligned}$$

Si se diseña el molde con las dimensiones 25.40 × 25.40 × 3.05 cm, la pieza colada se contraerá a las dimensiones requeridas.

Cuando un material isótropo se calienta de forma lenta y uniforme, el material se expande de manera uniforme sin crear esfuerzos residuales. No obstante, si el material está restringido, los cambios dimensionales pueden no ser posibles y, en cambio, se forman esfuerzos. Estos **esfuerzos térmicos** están relacionados con el coeficiente de expansión térmica, el módulo de elasticidad E del material, y el cambio de temperatura ΔT:

$$\sigma_{\text{térmico}} = \alpha E \Delta T \tag{22-5}$$

Los esfuerzos térmicos pueden aparecer por varias fuentes. En estructuras rígidas grandes, como los puentes, las restricciones pueden aparecer como resultado del diseño. Algunos puentes se diseñan en secciones con placas de acero entre secciones, de modo que las secciones se mueven una con respecto a otra durante cambios de temperatura estacionales.

Cuando se unen materiales, por ejemplo al recubrir tinas de baño de hierro fundido con un esmalte cerámico o al recubrir álabes de superaleaciones para turbinas, con una barrera térmica de zirconio estabilizado con itrio (YSZ), los cambios en temperatura provocan diferentes cantidades de contracción o expansión en los distintos materiales. Esta disparidad lleva a esfuerzos térmicos que pueden ocasionar que el recubrimiento protector se desconche. Es necesario un cuidadoso ajuste para igualar las propiedades térmicas del recubrimiento con las del material del sustrato, para evitar grietas (si el coeficiente del recubrimiento es menor que el del sustrato base) o el desconchado (desprendimiento del recubrimiento debido a un alto coeficiente de expansión).

Puede presentarse una situación similar en materiales compuestos. Las fibras frágiles que tienen un menor coeficiente que la matriz pueden estirarse hasta el punto de ruptura cuando aumenta la temperatura del compuesto.

Los esfuerzos térmicos pueden aparecer incluso en un material isótropo no rígido si la temperatura no es uniforme. Al fabricar vidrio templado (capítulo 15), la superficie se enfría con más rapidez que el centro, lo cual permite que la superficie se contraiga inicialmente. Cuando el centro se enfría después, su contracción es restringida por la superficie rígida, provocando esfuerzos residuales en la superficie.

Ejemplo 22-5 *Diseño de un recubrimiento protector*

Se ha de aplicar un esmalte cerámico a una placa de acero 1020. La cerámica tiene una resistencia de 28 MPa a la fractura, un módulo de elasticidad de 103×10^3 MPa, y un coeficiente de expansión térmica de $10 \times 10^6 °C^{-1}$. Diseñe el cambio máximo de temperatura que pueda permitirse sin agrietamiento de la cerámica.

SOLUCIÓN

Debido a que el esmalte queda unido al acero 1020, esencialmente queda restringido. El acero también se expande cuando aumenta la temperatura. Su coeficiente de expansión térmica (tabla 22-2) es $12 \times 10^{-6} °C^{-1}$ y su módulo de elasticidad es 207×10^3 MPa. Como el acero se expande más que el esmalte, todavía expansión neto es

$$\Delta\alpha = 12 \times 10^{-6} - 10 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-6} °C^{-1}$$
$$\sigma = (2 \times 10^{-6})\,(15 \times 10^{-6})\,\Delta T = 4000$$
$$\Delta T = 133°C$$

Para permitir mayores variaciones de temperatura, se podría seleccionar un esmalte que tenga un más alto coeficiente de expansión térmica, un esmalte que tenga un menor módulo de elasticidad (de modo que se permitan deformaciones más grandes antes de que el esfuerzo llegue al esfuerzo de fractura), o un esmalte que tenga una resistencia mayor.

22-3 Conductividad térmica

La **conductividad térmica** k es una medida de la rapidez a la que se transmite calor en un material. El tratamiento de conductividad térmica es similar al de difusión (capítulo 5). *La conductividad térmica, similar al coeficiente de difusión, es una propiedad sensible a la microestructura*. La conductividad se relaciona con el calor Q transmitido por un determinado plano de área A por segundo, cuando existe un gradiente de temperatura $\Delta T/\Delta x$ (figura 22-5):

$$\frac{Q}{A} = -k\frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{22-6}$$

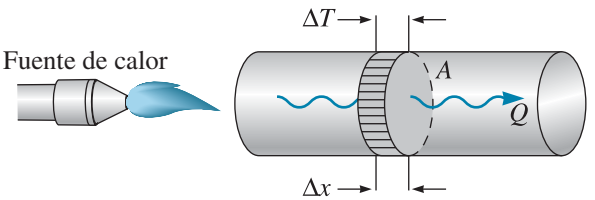


Figura 22-5 Cuando se calienta el extremo de una barra, un flujo de calor Q/A se mueve hacia el extremo frío con una rapidez determinada por el gradiente de temperatura producido en la barra.

El signo negativo de la ecuación 22-6 indica que el flujo de calor va desde las zonas de mayor temperatura hacia las de menor temperatura, por lo que si $\Delta T/\Delta x$ es negativo, Q será positivo. Observe que la conductividad térmica k desempeña la misma función en la transferencia de calor que el coeficiente de difusión D en la transferencia de masa. Entre todos los metales, la plata tiene la más alta conductividad térmica a temperatura ambiente (430 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). El cobre es el siguiente con una conductividad térmica de 400 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. En general, los metales tienen una mayor conductividad térmica que los materiales cerámicos; no obstante, el diamante, un material cerámico, tiene una conductividad térmica muy alta de 2000 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. En la tabla 22-3 aparecen valores de la conductividad térmica de algunos materiales.

La energía térmica es transferida por dos mecanismos importantes: transferencia de electrones libres y vibraciones de red (o fonones). Los electrones de valencia ganan energía, se mueven hacia las zonas más frías del material y transfieren su energía a los átomos. La cantidad de energía transferida depende del número de electrones excitados y de su movilidad; éstos, a su vez, dependen del tipo de material, de imperfecciones en la red, así como de la temperatura. Además, las vibraciones térmicamente inducidas de los átomos transfieren energía a través del material.

Metales

Debido a que la banda de valencia no está llena por completo en los metales, los electrones requieren poca excitación térmica para moverse y contribuir a la transferencia de calor.

Tabla 22-3 Valores comunes de conductividad térmica a temperatura ambiente de algunos materiales

Material	Conductividad térmica (k) ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Material	Conductividad térmica (k) ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Metales puros		**Materiales cerámicos**	
Ag	430	Al_2O_3	16–40
Al	238	Carbono (diamante)	2000
Cu	400	Carbono (grafito)	335
Fe	79	Arcilla refractaria	0.26
Mg	100	Carburo de silicio	hasta 270
Ni	90	AlN	hasta 270
Pb	35	Si_3N_4	hasta 150
Si	150	Vidrio de cal y sosa	0.96–1.7
Ti	22	Sílice vítrea	1.4
W	171	Vidrio Vycor TM	12.5
Zn	117	ZrO_2	2–3
Zr	23	**Polímeros**	
Aleaciones		Nylon 6,6	0.25
Acero 1020	100	Polietileno	0.33
Aleación de aluminio 3003	280	Poliimida	0.21
Acero inoxidable 304	30	Poliestireno	0.13
Cementita	50	Espuma de poliestireno	0.029
Cu-30% Ni	50	Teflón	0.25
Ferrita	75		
Fundición de hierro gris	79.5		
Latón amarillo	221		

Nota: $1\frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}} = 418.4\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

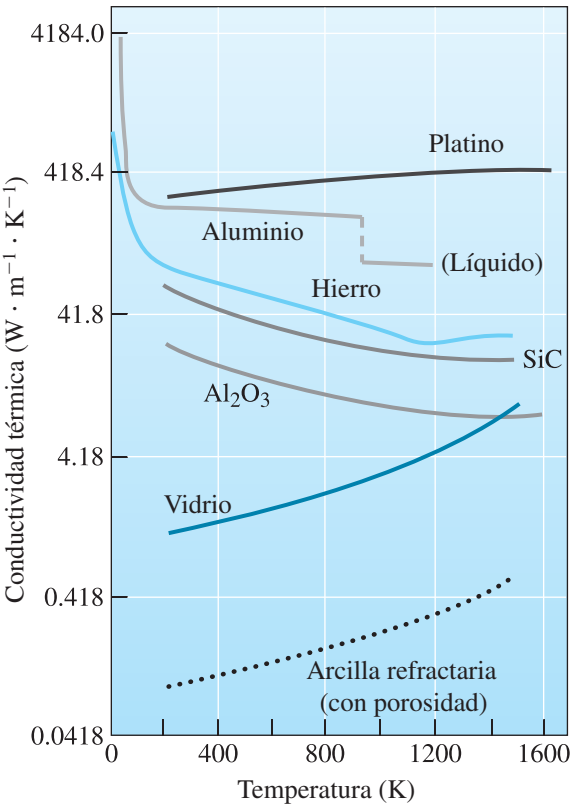


Figura 22-6 Efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica de algunos materiales. Observe la escala logarítmica en el eje vertical.

Como la conductividad térmica de los metales se debe principalmente a la aportación electrónica, se espera una relación entre las conductividades térmica y eléctrica:

$$\frac{k}{\sigma T} = L = 5.8 \times 10^{-9} \frac{\text{cal} \cdot \text{ohm}}{\text{s} \cdot \text{K}^2} = 2.45 \times 10^{-8} \frac{\text{W} \cdot \text{ohm}}{\text{K}^2} \qquad (22\text{-}7)$$

donde L es el **número de Lorenz**. Esta relación es seguida hasta cierto límite en muchos metales.

Cuando aumenta la temperatura del material, dos factores que se contraponen afectan la conductividad térmica. Se espera que las temperaturas más altas aumenten la energía de los electrones, creando más "portadores" e incrementando la aportación de las vibraciones de la red; estos efectos incrementan la conductividad térmica. Al mismo tiempo, el mayor número de vibraciones de la red dispersa a los electrones, reduciendo su movilidad y, por lo tanto, tienden a reducir la conductividad térmica. El efecto combinado de estos factores lleva a un comportamiento muy diferente para distintos metales. Para el hierro, la conductividad térmica disminuye al principio al aumentar la temperatura (debido a la menor movilidad de los electrones), y luego aumenta ligeramente (debido a más vibraciones en la red). La conductividad *disminuye* continuamente cuando el aluminio se calienta, pero *aumenta* continuamente cuando el platino se calienta (figura 22-6).

La conductividad térmica en los metales también depende de los defectos en la estructura cristalina, de la microestructura y del procesamiento. Así, los metales trabajados en frío, los metales endurecidos por solución sólida y las aleaciones de dos fases pueden mostrar conductividades inferiores en comparación con sus similares que no tengan defectos.

Materiales cerámicos

La brecha de energía en materiales cerámicos es demasiado grande para que muchos electrones sean excitados hacia la banda de conducción, excepto a temperaturas muy altas. Entonces, la transferencia de calor en materiales cerámicos ocurre básicamente por vibraciones de la red (o fonones). Como la contribución electrónica está ausente, la conductividad térmica de casi todos los materiales cerámicos es mucho menor que la de los metales. Sin embargo, la razón principal por la cual la conductividad observada experimentalmente en materiales cerámicos es baja, es el nivel de porosidad. La porosidad incrementa la dispersión. El mejor ladrillo aislante, por ejemplo, contiene una fracción grande de porosidad. Una sinterización efectiva reduce la porosidad (y por lo tanto incrementa la conductividad térmica).

Los vidrios tienen una conductividad térmica baja. La estructura amorfa, débilmente empaquetada, reduce al mínimo los puntos en los cuales las cadenas de silicatos se ponen en contacto entre sí, haciendo más difícil la transferencia de fotones. La conductividad térmica aumenta a medida que se incrementa la temperatura; temperaturas más altas producen más fonones energéticos y una más rápida transferencia de calor. En algunas aplicaciones, como en vidrios para ventanas, se usan hojas dobles de vidrio y se separan usando un gas (Ar, por ejemplo) para obtener mejor aislamiento térmico. También es posible usar diferentes recubrimientos sobre vidrios para hacer que los edificios y automóviles sean más eficientes en el uso de energía.

Las estructuras más ordenadas de los materiales cerámicos cristalinos, así como de los vidrios-cerámicos que contienen grandes cantidades de precipitados cristalinos, producen menos dispersión de fonones. En comparación con los vidrios, estos materiales tienen una conductividad térmica más alta, pero cuando aumenta la temperatura, la dispersión se vuelve más pronunciada y la conductividad térmica disminuye (como se ve en la figura 22-6 para el carburo de silicio). A temperaturas todavía más altas, la transferencia de calor por radiación se hace importante y aumenta la conductividad. La conductividad térmica de los materiales cerámicos policristalinos es por lo general menor que la de cristales individuales.

Algunos materiales cerámicos, como el diamante, tienen conductividades térmicas muy altas. Los materiales con estructura muy empaquetada, y módulos de elasticidad altos, producen fonones de alta energía que estimulan altas conductividades térmicas. Se ha demostrado que numerosos materiales cerámicos con una estructura cristalina semejante al diamante (por ejemplo, AlN, SiC, BeO, BP, GaN, Si, AlP) tienen altas conductividades térmicas. Por ejemplo, se ha informado de conductividades térmicas de $\sim$270 W $m^{-1}K^{-1}$ para el SiC y el AlN. Aun cuando el SiC y el AlN son buenos conductores térmicos, también son aislantes eléctricos; por lo tanto, estos materiales son buenos candidatos para su uso en sustratos de paquetes electrónicos donde la disipación de calor es necesaria.

Semiconductores El calor es conducido en semiconductores por fonones y electrones. A bajas temperaturas, los fonones son los principales portadores de energía, pero a temperaturas más altas, los electrones son excitados por la pequeña brecha de energía de la banda de conducción y la conductividad térmica aumenta de forma considerable.

Polímeros La conductividad térmica de los polímeros es muy baja, incluso en comparación con los vidrios de silicato. La vibración y el movimiento de cadenas moleculares de polímeros transfieren energía. Si se incrementa el grado de polimerización, se incrementa la cristalinidad, se reducen al mínimo las ramificaciones y hay grandes entrelazamientos, se obtiene una estructura más rígida y una conductividad térmica más alta.

La conductividad térmica de numerosos materiales de ingeniería depende de las fracciones volumétricas de las diferentes fases y de su conectividad. Las resinas epóxicas cargadas de plata se emplean en muchas aplicaciones de transferencia de calor relacionadas con microelectrónica. Se obtiene un aislamiento térmico excepcionalmente bueno con el uso de espumas de polímero, a veces producido de poliestireno o poliuretano. Las tazas de café de Styrofoam^{MR} son un producto típico.

Ejemplo 22-6 *Diseño de un vidrio para ventanas*

Diseñe un vidrio para una ventana cuadrada de 120 cm $\times$ 120 cm que separa una habitación a 25°C del exterior que está a 40°C y permite que no más de 5×10^6 cal de calor entren cada día a la habitación. Suponga que la conductividad térmica del vidrio es $0.96 W \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$ o $0.0023 \dfrac{cal}{cm \cdot s \cdot K}$.

SOLUCIÓN

De la ecuación 22-6,

$$\frac{Q}{A} = -k\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

donde Q/A es el calor transferido por segundo por la ventana.

$$1 \text{ día} = (24 \text{ h/día})(3\,600 \text{ s/h}) = 8.64 \times 10^4 \text{ s}$$
$$A = (120 \text{ cm})^2 = 1.44 \times 10^4 \text{ cm}^2$$

$$Q = \frac{(5 \times 10^6 \text{ cal/día})}{8.64 \times 10^4 \text{ s/día}} = 57.87 \text{ cal/s}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{57.87 \text{ cal/s}}{1.486 \times 10^4 \text{ cm}^2} = 0.00389 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\frac{Q}{A} = 0.00389 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = -\left(0.0023 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}}\right)(25°\text{C} - 40°\text{C})/\Delta x$$

$$\Delta x = 8.9 \text{ cm} = \text{grosor}$$

El vidrio tendría que ser excepcionalmente grueso para impedir el flujo térmico máximo deseado. Se podrían hacer varias cosas para reducir el flujo de calor. Aun cuando todos los vidrios de silicato tienen conductividades térmicas similares, se podría usar un material polímero transparente (como el polimetilmetacrilato). Los polímeros tienen conductividades térmicas de aproximadamente un orden de magnitud menor que los vidrios cerámicos. Se podría usar un vidrio doble, con paneles de vidrio separados, ya sea por un gas (el aire o el Ar tienen muy bajas conductividades térmicas) o una hoja de polímero transparente.

22-4 Choque térmico

Los esfuerzos que llevan a la fractura de materiales frágiles pueden introducirse térmica y mecánicamente. Cuando una pieza de material se enfría con gran rapidez, se produce un gradiente de temperatura, el cual puede llevar a diferentes cantidades de contracción en distintas partes. Si los esfuerzos residuales de tensión se vuelven lo suficientemente altos, los defectos pueden propagarse y provocar falla. Es por ello que no es seguro verter agua fría en un recipiente caliente de vidrio para hornear que ha sido retirado del horno, ya que si se enfría muy rápidamente se romperá. Un comportamiento similar puede ocurrir si el material se caliente rápidamente. Esta falla de un material provocada por esfuerzos inducidos por rápidos cambios de temperatura se conoce como **choque térmico**. Diversos factores afectan el comportamiento del choque térmico:

1. *Coeficiente de expansión térmica*: Un coeficiente bajo reduce al mínimo los cambios dimensionales y también la capacidad de resistir el choque térmico.
2. *Conductividad térmica*: La magnitud del gradiente de temperatura está determinado en parte por la conductividad térmica del material. Una conductividad térmica alta ayuda a transferir calor y reducir diferencias de temperatura rápidamente en el material.
3. *Módulo de elasticidad*: Un módulo de elasticidad bajo permite grandes cantidades de deformación antes de que el esfuerzo alcance el nivel crítico requerido para provocar fractura.
4. *Esfuerzo a la fractura*: Un alto esfuerzo requerido para la fractura permite tener deformaciones más grandes.
5. *Transformaciones de fase*: Los cambios dimensionales adicionales pueden ser provocados por transformaciones de fase. Por ejemplo, la transformación del sílice de cuarzo a cristobalita, introduce esfuerzos residuales y aumenta los problemas con el choque térmico. Del mismo modo, no se puede usar el material cerámico $PbTiO_3$ puro en ambientes sujetos a cambios de temperatura grandes y repentinos, porque los esfuerzos inducidos durante la transformación cúbica a tetragonal provocarán que el material cerámico se fracture.

Un método para medir la resistencia al choque térmico es determinar la máxima diferencia de temperatura que pueda ser tolerada durante un templado sin afectar las propiedades mecánicas del material. El vidrio de sílice pura (fundido) tiene una resistencia al choque térmico de aproximadamente 3000°C. En la figura 22-7 se muestra el efecto de la diferencia de temperatura en el módulo de ruptura del sialon ($Si_3Al_3O_3N_5$) después del templado; no hay evidencia de grietas ni de cambio en las propiedades del material cerámico sino hasta que la diferencia en temperatura de templado se aproxime a 950°C. Otros materiales cerámicos tienen menores resistencias. La resistencia al choque para la zirconia parcialmente estabilizada (PSZ) y Si_3N_4 es de unos 500°C; para el SiC es de 350°C; y para el Al_2O_3 y el vidrio ordinario, de unos 200°C.

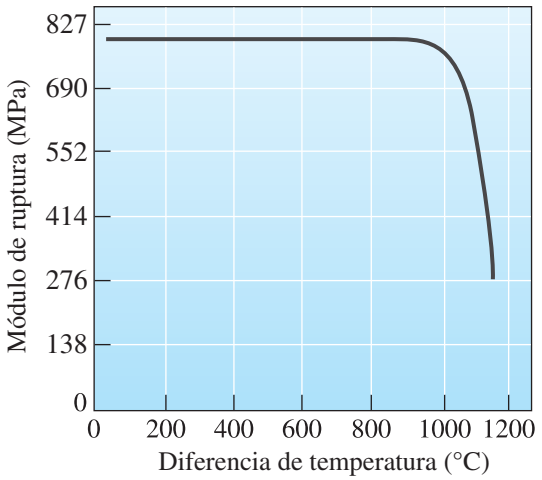


Figura 22-7 Efecto de la diferencia de temperatura de templado en el módulo de ruptura del sialon. La resistencia al choque térmico del material cerámico disminuye a unos 950°C.

Otra forma de evaluar la resistencia de un material al choque térmico es mediante el parámetro de choque térmico (R' o R).

$$R' = \text{Parámetro de choque térmico} = \frac{\sigma_f k(1 - v)}{E \cdot \alpha} \tag{22-8a}$$

o

$$R = \frac{\sigma_f(1 - v)}{E \cdot \alpha} \tag{22-8b}$$

donde σ_f es el esfuerzo a la fractura del material, v la relación de Poisson, k la conductividad térmica, E el módulo de elasticidad y α el coeficiente lineal de expansión térmica. La ecuación 22-8*b* se utiliza en situaciones donde la rapidez de transferencia de calor es infinita en esencia. Un valor más alto del parámetro de choque térmico significa mejor resistencia al choque térmico. El parámetro del choque térmico representa el máximo cambio de temperatura que puede ocurrir sin fracturar el material.

Por lo general, el choque térmico no es problema en casi todos los metales porque éstos normalmente tienen suficiente ductilidad para permitir deformación y no la fractura. Como ya se mencionó, innumerables composiciones de materiales cerámicos creadas como materiales cerámicos de expansión térmica cero (basados en fosfatos de sodio y zirconio) y muchos materiales de vidrio-cerámicos tienen excelente resistencia al choque térmico.

Resumen

- Las propiedades térmicas de los materiales pueden explicarse, al menos parcialmente, por el movimiento de electrones y fonones.
- La capacidad calorífica y el calor específico representan la cantidad de energía requerida para incrementar un grado la temperatura de una cantidad determinada de material; la temperatura, la estructura cristalina y los enlaces influyen sobre ellos.
- El coeficiente de expansión térmica describe los cambios dimensionales que ocurren en un material cuando cambia su temperatura. Fuertes enlaces llevan a un bajo coeficiente de expansión. Los metales con alto punto de fusión y los materiales cerámicos tienen coeficientes bajos, mientras que los metales con bajo punto de fusión y los polímeros tienen coeficientes altos.
- La expansión térmica de muchos materiales de ingeniería puede acercarse a cero al controlar de forma apropiada las combinaciones de las diferentes fases que muestran coeficientes de expansión térmica positivos y negativos. El material vidrio-cerámico Zerodur^{MR} y los materiales cerámicos NZP son ejemplos de estos materiales.

- Debido a la expansión térmica, se crean esfuerzos en un material cuando cambia la temperatura. Se requiere de cuidado en el diseño, procesamiento o selección de materiales para impedir fallas debidas a esfuerzos térmicos.
- El calor es transferido en materiales por medio de fonones y electrones. La conductividad térmica depende de las contribuciones relativas de cada uno de estos mecanismos, así como de la microestructura y la temperatura.
- Los fonones desempeñan una importante función en las propiedades térmicas de los materiales cerámicos, semiconductores y polímeros. Las estructuras desordenadas, por ejemplo vidrios cerámicos o polímeros amorfos, dispersan los fonones y tienen baja conductividad.
- La conductividad térmica es sensible a la microesctructura. Los materiales cerámicos que por lo general se encuentran tienen una baja conductividad térmica debido a su porosidad y a defectos.
- Los materiales cerámicos cristalinos y los polímeros tienen conductividades más altas que sus similares vítreos o amorfos.
- Las aportaciones electrónicas a la conductividad térmica son más importantes en metales; en consecuencia, las imperfecciones en la red que dispersan electrones reducen la conductividad. Una temperatura creciente incrementa la energía de los fonones pero también la dispersión tanto de los fonones como de los electrones.

Glosario

Calor específico Energía necesaria para incrementar un grado la temperatura de un gramo de un material.

Capacidad calorífica Energía requerida para incrementar un grado la temperatura de un mol de un material.

Choque térmico Falla de un material provocada por esfuerzos introducidos por cambios repentinos de temperatura.

Coeficiente lineal de expansión térmica Describe la cantidad que cambia cada longitud unitaria de material cuando la temperatura de ese material varía un grado.

Conductividad térmica Propiedad sensible a la microestructura que mide la rapidez a la que se transfiere calor por un material.

Esfuerzos térmicos Esfuerzos introducidos en un material debido a diferencias en la cantidad de expansión o contracción que ocurren por un cambio de temperatura.

Fonón Paquete de ondas elásticas. Está caracterizado por su energía, longitud de onda o frecuencia, que transfieren energía a través de un material.

Número de Lorenz Constante que relaciona la conductividad eléctrica con la térmica.

Problemas

Sección 22-1 Capacidad térmica y calor específico

22-1 Exprese dos aplicaciones en las que resulta deseable una alta conductividad térmica.

22-2 Exprese dos aplicaciones en las que resulta deseable una baja conductividad térmica de un material.

22-3 ¿Cuál será el error porcentual cuando $3R$ es 6 cal/(mol·K) si la constante del gas es exactamente 1.987 cal /(mol·K)?

22-4 En referencias antiguas del idioma inglés podemos encontrar las unidades de calor específico BTU/(lbm·°R), donde BTU es la unidad térmica británica, lbm son libras y°R son grados Rankine. Busque los factores de conversión para estas unidades y determine el calor específico del agua con estas unidades.

22-5 ¿Cuáles de los metales listados en la tabla 22-1 tienen el mayor y menor calor específicos? Mencione también cuáles son sus masas atómicas.

22-6 Calcule el aumento de temperatura para muestras de 1 kg de los siguientes metales cuando se aplican 20,000 joules de calor al metal a 25°C:

a) Al,
b) Cu,
c) Fe y
d) Ni.

22-7 Calcule el calor (en calorías y joules) necesario para incrementar 50°C la temperatura de 1 kg de los siguientes materiales:
a) plomo,
b) níquel,
c) Si_3N_4 y
d) naylon 6,6.

22-8 Calcule la temperatura de una muestra de 100 g de los siguientes materiales (originalmente a 25°C) cuando se les introducen 3000 calorías:
a) tungsteno,
b) titanio,
c) Al_2O_3 y
d) polietileno de baja densidad.

22-9 Un aislante de alúmina para un dispositivo eléctrico también debe servir como disipador de calor. Durante su uso, se observa un incremento de temperatura de 10°C en un aislante de alúmina de $1 \times 1 \times 0.02$ cm. Determine el grosor de un aislante de polietileno de alta densidad que sería necesario para obtener el mismo desempeño como disipador de calor. La densidad de la alúmina es de 3.96 g/cm^3.

22-10 Una muestra de 200 g de aluminio se calienta a 400°C y a continuación se templa en 2000 cm^3 de agua a 20°C. Calcule la temperatura del agua después de que el aluminio y el agua alcancen el equilibrio. Suponga que no hay pérdida de calor de este sistema.

Sección 22-2 Expansión térmica

22-11 Una casa vieja tiene una tubería de plomo en el sótano que mide 450 cm desde el calentador de agua hasta la llave del lavabo. El sótano es húmedo y tiene una temperatura de 20°C, mientras que el agua que viaja en la tubería tiene una temperatura de 53°C. ¿Qué expansión lineal experimenta la tubería?

22-12 Se fabrica una hoja de vidrio de cal y sosa, de 2 m de largo, a 1400°C. Determine su longitud después de que se enfríe a 25°C.

22-13 Una pieza fundida de cobre requiere que sus dimensiones finales sean $2.5 \times 50 \times 10$ cm. Determine las dimensiones del modelo que debe usarse para elaborar el molde en el que se vacía el cobre líquido durante el proceso de manufactura.

22-14 Se ha de fabricar una pieza fundida de cobre que tenga las dimensiones finales de $2.5 \times 30 \times 60$ cm. Determine las dimensiones del modelo que debe usarse para elaborar el molde en el que se vacía el cobre líquido durante el proceso de manufactura.

22-15 Una pieza de aluminio fundido se fabrica usando el proceso de molde permanente. En este proceso se vacía aluminio líquido en un molde de hierro fundido gris que se calienta a 350°C. Se desea producir una pieza fundida de aluminio que mide 38 cm a 25°C. Calcule la longitud de la cavidad que debe maquinarse en el molde de hierro fundido gris.

22-16 Una tira de aleación de Ti y una tira de acero inoxidable se unen por laminado a 760°C. Si la longitud total de la tira bimetálica es de 1 m de largo cuando se lamina en caliente, calcule la longitud de cada tira de metal a 25°C. ¿Cuál es la naturaleza del esfuerzo (compresión o tensión) justo bajo la superficie del lado de la aleación de Ti y en el lado de acero inoxidable?

22-17 Se recubre un alambre de cobre de 100 cm de largo y 2 mm de diámetro con un recubrimiento de aislante epóxico de 0.5 mm de grueso. Determine la longitud del cobre y del recubrimiento cuando su temperatura aumenta de 25 a 250°C. ¿Qué es probable que le ocurra al recubrimiento epóxico como resultado de este calentamiento?

22-18 Se produce un material compuesto bimetálico de 25 cm de largo, compuesto por una tira de latón amarillo unida a una tira de Invar. Determine la longitud a la que cada material se dilatará cuando la temperatura aumenta de 20 a 150°C. Trace un bosquejo que muestre lo que le ocurrirá a la forma de la tira bimetálica.

22-19 Proporcione ejemplos de materiales que tengan coeficientes de expansión térmica negativos o casi iguales a cero.

22-20 ¿Qué es el Zerodur^{MR}? ¿Cuáles son algunas de las propiedades y aplicaciones de este material?

22-21 Una pieza maquinada de níquel se recubre con SiC para obtener resistencia a la corrosión a altas temperaturas. Si no hay esfuerzos residuales presentes en la pieza a 20°C, determine los esfuerzos térmicos que se forman cuando la pieza se calienta a 1000°C durante su uso. El módulo elástico de SiC es 413,700 MPa

22-22 Se incorporan fibras de alúmina de 2 cm de largo a una matriz de aluminio. Suponiendo que hay buen enlace entre las fibras de material cerámico y el aluminio, estime los esfuerzos térmicos que actúan sobre la fibra cuando aumenta 250°C la temperatura del compuesto. ¿Los esfuerzos sobre la fibra son de tensión o de compresión? El módulo elástico de la alúmina es 386,120 MPa.

22-23 Una barra de cobre de 60 cm de largo con límite elástico de 207 Mpa se calienta a 120°C e inmediatamente se sujeta con firmeza a una estructura rígida. ¿El cobre se deformará plásticamente durante el enfriamiento a 25°C? ¿Cuánto se deformará la barra si se suelta de la estructura después del enfriamiento?

22-24 Repita el problema 22-23, pero usando una varilla de carburo de silicio y no una de cobre. El módulo elástico del SiC es 413,700 MPa.

Sección 22-3 Conductividad térmica

Sección 22-4 Choque térmico

22-25 Defina los términos conductividad térmica y choque térmico de los materiales.

22-26 La conductividad térmica de la mayoría de los materiales cerámicos es baja. ¿Cierto o falso? Explique.

22-27 ¿La conductividad térmica de los materiales es una propiedad sensible a la microestructura? Explique.

22-28 Determine el flujo de calor mínimo (flujo de calor por unidad de área) que se presenta cuando un vidrio de sosa y cal de 5 mm de grosor se expone a agua hirviendo en un lado y a agua congelada del otro lado.

22-29 Si una barra de plata de 1 m de largo se calienta en un extremo a 300°C y la temperatura medida en el otro extremo es de 100°C, calcule el calor transferido por unidad de área.

22-30 Una placa de 3 cm de carburo de silicio separa aluminio líquido (que se mantiene a 700°C) de un casco de acero enfriado por agua y que se mantiene a 20°C. Calcule el calor Q transferido al acero por cm^2 de carburo de silicio en cada segundo.

22-31 Una hoja de 0.025 cm de polietileno está emparedada entre dos hojas de $90 \times 90 \times 0.3$ cm de vidrio de sosa y cal para fabricar una ventana. Calcule *a*) el calor perdido a través de la ventana cada día cuando la temperatura de la habitación es de 25°C y el aire exterior está a 0°C y *b*) el calor que entra a través de la ventana cada día cuando la temperatura de la habitación es de 25°C y el aire exterior está a 40°C.

22-32 Se desea construir una placa de deflexión de calor que permita la transferencia rápida de calor paralelamente a la hoja, pero lenta en la dirección perpendicular a la hoja. En consecuencia, se incorpora 1 kg de alambres de cobre dispuestos en una sola dirección, cada uno de 0.1 cm de diámetro, en una matriz de polímero poliimida de 5 kg. Estime la conductividad térmica en la dirección paralela y en la dirección perpendicular a los alambres.

22-33 Una reacción exotérmica en el electrodo de una batería libera 80 MW de potencia por metro cuadrado. El electrodo está formado por una capa de grafito de 5 μm de grueso en una hoja de cobre de 20 μm de grueso; la reacción ocurre en la superficie del grafito y es necesario que el calor sea transferido hacia afuera por el grafito de la hoja de cobre. La temperatura del lado exterior de la hoja de cobre se mantiene a 30°C. ¿Cuál es la temperatura en la superficie interior del electrodo?

22-34 Suponga que se sumerge una varilla de aluminio, de 1 cm de diámetro y 10 cm de largo, en un litro de agua a 20°C. El otro extremo de la varilla está en contacto con una fuente de calor que opera a 400°C. Determine el tiempo necesario para calentar el agua a 25°C si 75% del calor se pierde por radiación desde la barra.

22-35 Determine el número de Lorenz con ayuda de los datos de la plata que se encuentran en el libro. ¿Cuál es el diferencial porcentual del valor dado y por qué considera que se presentan estas diferencias?

22-36 Escriba las ecuaciones que definen el parámetro de resistencia térmica de choque (RCT). Con base en esto, ¿qué puede decir acerca de los materiales que muestran un coeficiente de expansión térmica cercano a cero?

22-37 El hierro fundido gris tiene una conductividad térmica más alta que el hierro fundido dúctil o maleable. Revise el capítulo 13 y explique por qué puede esperarse esta diferencia en conductividad.

Problemas de diseño

22-38 Un recipiente para reacciones químicas contiene líquidos a una temperatura de 680°C. La pared del recipiente debe construirse de modo que la pared exterior opere a una temperatura de 35°C o menor. Diseñe la pared del recipiente y los materiales apropiados si la transferencia calorífica máxima es de 6000 cal/s.

22-39 Diseñe un panel de metal recubierto con esmalte vítreo capaz de soportar un ciclado térmico entre 20 y 150°C. Es de esperar que los vidrios que por lo general se encuentran en el mercado tengan una resistencia a la tensión de 34 MPa y una resistencia a la compresión de 345 MPa.

22-40 ¿Cuáles limitaciones de diseño existen para seleccionar materiales para un álabe de turbina en un motor a reacción capaz de operar a altas temperaturas?

22-41 Considere los requerimientos de una constante dieléctrica baja, de una pérdida dieléctrica baja, buena resistencia mecánica y alta conductividad térmica para sustratos de empaquetamiento electrónico. ¿Qué materiales seleccionaría?

Problemas por computadora

22-42 *Parámetros de resistencia al choque térmico.* Edite un programa de cómputo o use software

de hoja de cálculo que proporcione el valor de parámetros de resistencia al choque térmico (RCT), cuando se dan los valores del esfuerzo a la fractura, la conductividad térmica, el módulo de Young, la relación de Poisson y el coeficiente de expansión térmica.

Problemas Knovel[MR]

K22-1 La capacidad térmica molar es la energía necesaria para incrementar un grado la temperatura de un mol de un material. ¿Cuánto calor se requiere para llevar al punto de fusión 50 moles de etanol almacenados a 25°C? (Observe que el etanol también se conoce como alcohol etílico.)

K22-2 El coeficiente de expansión térmica es el cambio en longitud de un material, por unidad de longitud por grado de cambio de temperatura. Una barra de oro mide inicialmente 1 m de largo. ¿Cuál es la longitud de la barra de oro después de calentarla de 298 a 473 K?

K22-3 Tres disipadores de calor son idénticos, excepto que fueron fabricados de materiales diferentes: oro, plata y cobre. ¿Cuál disipador extrae el calor con más rapidez?

El proceso de la corrosión afecta muchas áreas importantes de la tecnología, como la construcción y manufactura de puentes, aviones, barcos y la microelectrónica, la industria de alimentos, exploración espacial, redes de fibra óptica y plantas de energía eléctrica nuclear y convencional, por mencionar algunas. La corrosión puede evitarse o contenerse si se usan diferentes técnicas que incluyen el uso de recubrimientos y protección anódica y catódica.

Como el acero es el material estructural más importante y puede ser altamente susceptible a la corrosión, dependiendo de su composición, la corrosión en el acero es un problema importante en ingeniería. La fotografía de esta página muestra la oxidación de barras de acero que se usan para reforzar concreto (conocidas como "varillas de refuerzo") cuando quedan expuestas a la intemperie. El óxido que por lo general se observa en aceros es óxido de hierro que se forma como resultado de una reacción electroquímica conocida como corrosión galvánica. En este proceso, el acero se consume para formar el frágil óxido, que puede descascararse posteriormente y degradar la barra. (©*Glenn Volkman/Alamy*).

CAPÍTULO

23

Corrosión y desgaste

Se ha preguntado alguna vez:

- *¿Por qué se oxida el hierro?*
- *¿Qué proceso utiliza la erosión mecánica y la corrosión química en la manufactura de chips semiconductores?*
- *¿Si los metales como el aluminio y el titanio sufren corrosión?*
- *¿Si el proceso de corrosión tiene alguna utilidad?*
- *¿Por qué los tanques de calentadores de agua domésticos contienen varillas de Mg?*
- *¿Qué significa el acrónimo "WD-40[MR]"?*
- *¿Cómo afecta la corrosión a la vida útil de diferentes componentes, por ejemplo, los cigüeñales?*

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos clave de este capítulo son:

- Resumir los mecanismos y factores que contribuyen a la corrosión de los materiales.
- Predecir cuál metal actuará como ánodo y cuál como cátodo y calcular la diferencia de potencial entre ellos cuando dos metales se encuentran en contacto eléctrico en un medio acuoso.
- Calcule la tasa de corrosión de un ánodo empleando la ecuación de Faraday.
- Calcular el potencial de electrodo de una semicelda en una solución no estándar utilizando la ecuación de Nernst.
- Identificar las características microestructurales de los metales que promueven la corrosión electroquímica.
- Explicar la operación de una batería y el proceso de electrochapado.
- Elegir las técnicas de procesamiento e incorporar las características de diseño que limitan la corrosión y el desgaste en aplicaciones de ingeniería mecánica.
- Explicar la forma en que los polímeros son susceptibles a la degradación por microbios y por ambiente.

- Predecir la morfología de una película de óxido metálico.
- Explicar los mecanismos físicos de los procesos de desgaste y erosión.

La composición e integridad física de un material sólido se alteran en un ambiente corrosivo. En la corrosión química, un líquido corrosivo disuelve el material. Los metales y ciertos materiales cerámicos reaccionan en un ambiente gaseoso, por lo general a temperaturas altas, y el material puede destruirse debido a la formación de óxido y otros compuestos. Los polímeros se degradan al ser expuestos al oxígeno a temperaturas altas. Los materiales pueden alterarse si se exponen a una radiación o incluso a bacterias. Por último, diversos mecanismos de desgaste y corrosión por desgaste alteran la forma de los materiales.

La palabra "herrumbre" se asocia por lo general con la corrosión. Puede imaginar un automóvil abandonado y oxidado. En este capítulo aprenderemos que la herrumbre que se forma, por ejemplo, en el panel de acero de un automóvil, es óxido de hierro. Este proceso particular de oxidación o corrosión ocurre porque los átomos metálicos son removidos del material sólido como resultado de la producción de un circuito eléctrico. La pérdida de átomos degrada al metal y en algunos casos, como en el óxido del acero, se forma un subproducto sólido. Es menos probable que el mismo automóvil se hubiera oxidado de haberse mantenido en un estacionamiento limpio y seco. Con esto, podemos intuir que la corrosión se asocia con el ambiente y, de hecho, la **corrosión electroquímica,** como la descrita en este ejemplo, ocurre en medios acuosos como agua, aceite o aire húmedo. La corrosión ocurre a lo largo de un periodo de tiempo y puede ocurrir tanto en temperaturas altas como bajas.

La corrosión es un fenómeno costoso en todas sus formas. En estados Unidos cuesta alrededor de 3% del producto interno bruto (PIB) (es decir, cientos de miles de millones de dólares cada año). La corrosión afecta los sistemas de transporte (puentes, oleoductos, automóviles, aviones, trenes y barcos), servicios públicos (energía eléctrica, agua, telecomunicaciones y plantas de energía nuclear), así como en la producción y manufactura (industria alimenticia, microelectrónica y refinación de petróleo). Los ingenieros deben incorporar características adicionales a sus diseños o elegir materiales más costosos con el fin de evitar la corrosión. Cuando se presenta la corrosión, se deben realizar reparaciones y reemplazar partes. Las fallas que ocurren como consecuencia de la corrosión son costosas y pueden resultar fatales.

Aunque la mayoría de las veces pensamos que la corrosión es negativa, puede utilizarse para hacer revestimientos metálicos a los productos mediante un proceso que se conoce como **electrochapado**, cuyo principio fundamental se emplea en la tecnología de las baterías. Los procesos de corrosión y erosión químicas se utilizan para hacer superficies ultraplanas de obleas de silicio para procesadores microelectrónicos. Del mismo modo, la degradación y la disolución de ciertos biopolímeros son útiles en algunas aplicaciones médicas, por ejemplo, para disolver suturas.

El objetivo de este capítulo es presentar los principios y mecanismos por los cuales ocurren la corrosión y el desgaste bajo diferentes condiciones. Esto incluye la corrosión electroquímica, la oxidación de metales, la corrosión de productos cerámicos y la degradación de polímeros. Analizaremos la forma en la que diferentes factores afectan la tasa de corrosión y predeciremos si un sistema específico de materiales sufrirá corrosión empleando las **series galvánicas**, que son tablas de tendencias de los metales a sufrir corrosión en ambientes particulares. También analizaremos cómo la microestructura de los materiales influye en la corrosión y cuáles son las estrategias que se pueden emplear para prevenirla.

23-1 Corrosión química

En la **corrosión química**, o disolución directa, un material se disuelve en un medio líquido corrosivo. El material seguirá en disolución hasta que se consuma o el líquido se sature. Un ejemplo es la formación de una pátina de color verde en la superficie de aleaciones de base de cobre. Esto se debe a la formación de carbonato de cobre e hidróxidos de cobre y es la razón, por ejemplo, del aspecto

verdoso de la Estatua de la Libertad. La corrosión química del cobre, tantalio, silicio, dióxido de silicio y otros materiales se puede lograr mediante condiciones extremadamente bien controladas. En el procesamiento de obleas de silicio, por ejemplo, un proceso conocido como pulido químico mecánico se utilizan lodos de sílice para obtener una erosión mecánica. Este proceso crea superficies extremadamente planas que son apropiadas para el procesamiento de obleas de silicio. La corrosión química también se presenta en la naturaleza. Por ejemplo, la corrosión química de rocas mediante el ácido carbónico (H_2CO_3) y la erosión mecánica del viento y el agua desempeñan una importante función en la formación de cañones y cavernas.

Ataque por metal líquido

Los metales líquidos atacan primero un sólido en lugares de alta energía, como son los límites de grano. Si estas regiones continúan siendo atacadas de manera preferencial, en última instancia se presentarán grietas (figura 23-1). Con frecuencia esta forma de corrosión se complica por la presencia de fundentes que aceleran el ataque o por corrosión electroquímica. Metales agresivos como el litio líquido también pueden atacar a productos cerámicos.

Lixiviación selectiva

Un elemento particular en una aleación puede ser disuelto de manera selectiva, o lixiviado, del sólido. El **deszincificado** ocurre en latón que contiene más de 15% de Zn. Tanto el cobre como el zinc son disueltos por soluciones acuosas a temperaturas altas; los iones de zinc permanecen en una solución en tanto que los iones de cobre se vuelven a depositar en el latón (figura 23-2). Por último, el latón se hace poroso y débil.

La **corrosión grafítica** de hierro fundido gris se presenta cuando el hierro es disuelto de manera selectiva en agua o en tierra, desprendiendo hojuelas de grafito y un producto de la corrosión. La corrosión grafítica localizada a veces causa fugas o fallas de las tuberías de hierro gris que llevan gas, lo que provoca explosiones.

Figura 23-1 El plomo fundido se mantiene en cubas de acero gruesas durante la refinación. En este caso, el plomo fundido ha atacado una soldadura en una placa de acero y se han formado grietas. Por último, las grietas se propagan por el acero y el plomo fundido se fuga de la cuba. (*Reimpresa por cortesía de Don Askeland.*)

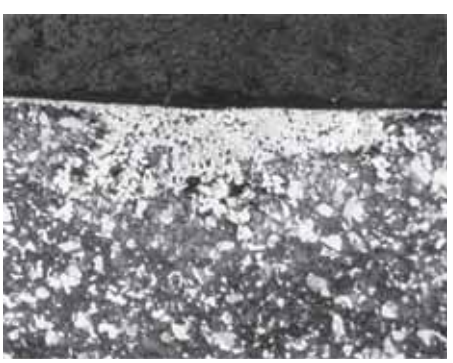


Figura 23-2 Micrografía de un depósito de cobre en latón, que muestra el efecto de deszincificado (50 ×). (*Reimpreso por cortesía de Don Askeland.*)

Disolución y oxidación de productos cerámicos

Los refractarios cerámicos que se usan para contener metal fundido durante la fundición o refinado pueden ser disueltos por las escorias que se producen en la superficie del metal. Por ejemplo, un refractario ácido (alto SiO_2) es rápidamente atacado por una escoria básica (alto CaO o MgO). Un vidrio producido de SiO_2 y Na_2O es rápidamente atacado por agua; debe agregarse CaO al vidrio para reducir al mínimo este ataque. El ácido nítrico puede lixiviar selectivamente hierro o sílice de algunos productos cerámicos, reduciendo su resistencia y densidad. La resistencia de vidrios de silicato depende de fallas que a veces son creadas por interacciones corrosivas con agua.

Ataque químico en polímeros

En comparación con los metales y materiales cerámicos de óxido, los plásticos se consideran resistentes a la corrosión. El Teflón^{MR} y el Viton^{MR} son algunos de los materiales más resistentes a la corrosión y se usan en numerosas aplicaciones, incluyendo la industria química de procesos. Éstos y otros materiales poliméricos pueden resistir la presencia de muchos ácidos, bases y líquidos orgánicos, pero los solventes agresivos con frecuencia se difunden en polímeros termoplásticos de peso molecular bajo. A medida que se incorpora un solvente en el polímero, las moléculas del polímero, más pequeñas, separan las cadenas y provocan hinchazón. Entonces se reduce la resistencia de los enlaces entre cadenas y esto conduce a polímeros más blandos, de menor resistencia, con una baja temperatura de transición vítrea. En casos extremos, la hinchazón provoca grietas por esfuerzo.

Los materiales termoplásticos también pueden ser disueltos en un solvente. Una exposición prolongada provoca una pérdida de material y debilitamiento de la pieza polimérica. Este proceso se presenta con más facilidad cuando la temperatura es alta y cuando el polímero tiene un bajo peso molecular, está muy ramificado, es amorfo y no tiene enlaces cruzados. La estructura del monómero también es importante; los grupos de CH_3 en la cadena polimérica del polipropileno pueden eliminarse con más facilidad de la cadena de iones de cloruro o de fluoruro en el cloruro de polivinilo (PVC) o del politetrafluoretileno (Teflón^{MR}). Éste tiene una resistencia excepcional al ataque químico de casi todos los disolventes.

23-2 Corrosión electroquímica

La **corrosión electroquímica**, que es la forma más común de ataque de metales, se presenta cuando los átomos del metal pierden electrones y se convierten en iones. A medida que el metal es gradualmente consumido por este proceso, por lo general se forma un subproducto del proceso de corrosión. La corrosión electroquímica ocurre con más frecuencia en un medio acuoso, en el que hay iones presentes en agua, tierra o aire húmedo. En este proceso se crea un circuito eléctrico y el sistema recibe el nombre de **celda electroquímica**. La corrosión de un tubo de acero o de un tablero de acero de un automóvil, que crea agujeros en el acero y óxido como subproducto, son ejemplos de esta reacción.

Aun cuando son causantes de la corrosión, las celdas electroquímicas también pueden tener cierta utilidad. Al crear de forma deliberada un circuito eléctrico, se pueden *electrochapar* capas protectoras o decorativas en materiales. En algunos casos, la corrosión electroquímica es incluso deseable. Por ejemplo, en el ataque químico de una superficie metálica pulida con un ácido apropiado, varias características de la microestructura son atacadas de forma selectiva, lo que permite observarlas. De hecho, casi todas las fotografías de las microestructuras metálicas y de aleaciones de este libro se obtuvieron de esta manera, haciendo así posible, por ejemplo, la observación de perlita en acero o límites de grano en cobre.

Componentes de una celda electroquímica

Hay cuatro componentes en una celda electroquímica (figura 23-3):

1. El **ánodo** cede electrones al circuito y se corroe.
2. El **cátodo** recibe electrones del circuito por medio de una reacción química, o catódica. Los iones que se combinan con los electrones producen un subproducto en el cátodo.

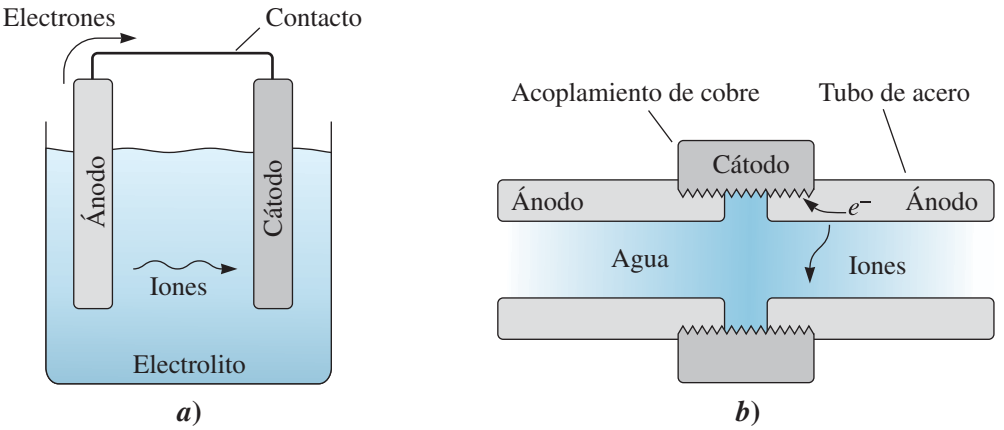


Figura 23-3 Componentes en una celda electroquímica: *a*) celda electroquímica simple y *b*) celda de corrosión entre un tubo de acero para agua y un acoplamiento de cobre.

3. El ánodo y el cátodo deben estar eléctricamente conectados, por lo general por contacto físico, para permitir que los electrones fluyan del ánodo al cátodo y continúe la reacción.
4. Un **electrolito** líquido debe estar en contacto tanto con el ánodo como con el cátodo. El electrolito es conductor, completando así el circuito. Proporciona los medios por los cuales los iones metálicos salen de la superficie del ánodo y se mueven al cátodo para aceptar los electrones.

Esta descripción de una celda electroquímica define la corrosión electroquímica. Si se depositan en el cátodo iones metálicos, ocurre un *electrochapado*.

Reacción anódica

El ánodo, que es un metal, experimenta una **reacción de oxidación** por medio de la cual se ionizan los átomos del metal. Los iones metálicos entran en la solución electrolítica, en tanto que los electrones salen del ánodo por la conexión eléctrica:

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^- \tag{23-1}$$

M representa los átomos del metal o iones, n es la carga del ion del metal y e^- son los electrones. Como los iones del metal salen del ánodo, éste se corroe, es decir, se oxida.

Reacción catódica en el electrochapado

En el electrochapado ocurre en el cátodo una **reacción de reducción** catódica, que es la inversa de la reacción anódica:

$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M \tag{23-2}$$

Los iones metálicos, ya sea que se hayan agregado de manera intencional al electrolito o que se hayan formado debido a la reacción anódica, se combinan con los electrones en el cátodo. El metal entonces se electrodeposita y cubre la superficie del cátodo. Sin embargo es importante observar que el electrochapado es un caso especial que no siempre ocurre.

Reacciones catódicas en la corrosión

Excepto en condiciones inusuales, el chapado de metales no ocurre durante la corrosión electroquímica. En cambio, la reacción de reducción forma un subproducto gaseoso, sólido o líquido en el cátodo (figura 23-4).

1. *El electrodo de hidrógeno*: En líquidos libres de oxígeno, por ejemplo, el ácido hidroclórico (HCl) o agua estancada, el gas hidrógeno puede desprenderse del cátodo:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow(\text{gas}) \tag{23-3}$$

Si el zinc se colocara en ese ambiente, se encontraría que toda la reacción es

$$\begin{aligned} Zn &\rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \text{ (reacción anódica)} \\ 2H^+ + 2e^- &\rightarrow H_2\uparrow\text{(reacción catódica)} \\ Zn + 2H^+ &\rightarrow Zn^{2+} + H_2\uparrow\text{(reacción general)} \end{aligned} \tag{23-4}$$

El ánodo de zinc se disuelve gradualmente y las burbujas de hidrógeno continúan desprendiéndose del cátodo.

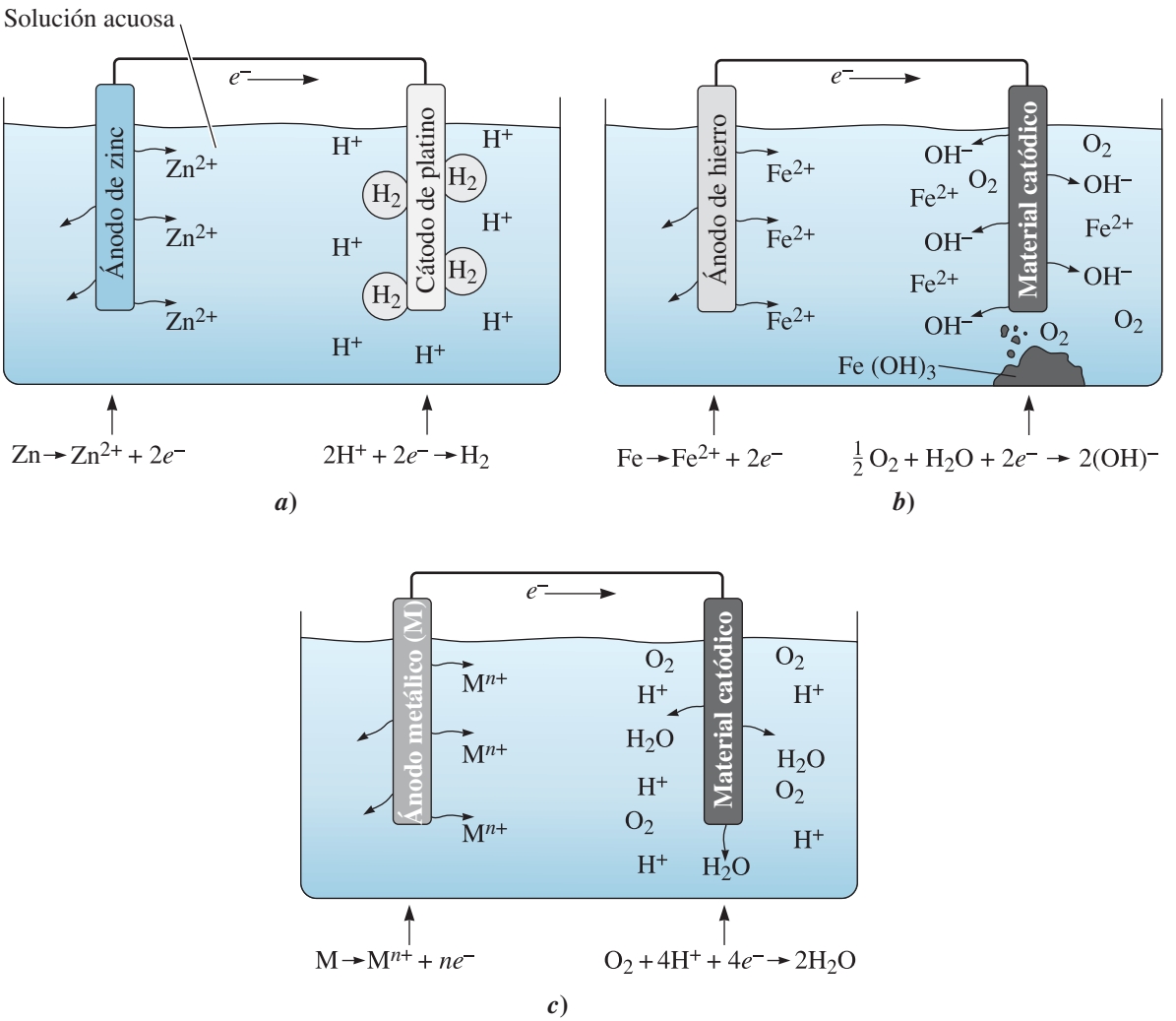


Figura 23-4 Reacciones anódicas y catódicas en celdas electrolíticas de corrosión comunes: *a*) electrodo de hidrógeno, *b*) electrodo de oxígeno y *c*) electrodo del agua.

2. *El electrodo de oxígeno*: En agua ventilada, existe oxígeno disponible para el cátodo, y se forman iones hidroxilo, es decir $(OH)^-$:

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^- \tag{23-5}$$

El electrodo de oxígeno enriquece al electrolito con iones $(OH)^-$. Estos iones reaccionan con iones metálicos cargados positivamente y crean un producto sólido. En el caso de la oxidación del hierro:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \text{ (reacción anódica)}$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- &\rightarrow 2(OH)^- \\ Fe^{2+} + 2(OH)^- &\rightarrow Fe(OH)_2 \end{aligned}\right\} \text{ (reacciones catódicas)} \tag{23-6}$$

$$Fe + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 \text{ (reacción general)}$$

La reacción continúa a medida que el $Fe(OH)_2$ reacciona con más oxígeno y agua:

$$2Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 \tag{23-7}$$

El $Fe(OH)_3$ se conoce por lo general como *herrumbre*.

3. *El electrodo del agua*: En la oxidación de los ácidos, la reacción catódica produce agua como subproducto:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \tag{23-8}$$

Si se dispone de una fuente continua de oxígeno e hidrógeno, el electrodo de agua no produce acumulación de herrumbre sólida ni una alta concentración o dilución de iones en el cátodo.

23-3 Potencial del electrodo en celdas electroquímicas

En la corrosión, de manera natural se forma un potencial cuando un material se coloca en una solución. En seguida se verá cómo se forma el potencial necesario para activar la reacción de corrosión.

Potencial del electrodo

Cuando en un electrolito se coloca un metal puro, se forma un **potencial del electrodo** que está relacionado con la tendencia del material a ceder sus electrones; no obstante, la fuerza de activación para la reacción de oxidación es compensada por una fuerza de activación igual, pero de sentido contrario para la reacción de reducción. No hay corrosión neta. En consecuencia, no se puede medir el potencial del electrodo para un material de un solo electrodo.

Serie de fuerzas electromotrices

Para determinar la tendencia de un metal a ceder sus electrones, se mide la diferencia de potencial entre el metal y un electrodo estándar por medio de una semicelda (figura 23-5). El electrodo del metal a probar se coloca en una solución de 1 mol (M) de sus iones. Un electrodo de referencia también se coloca en una solución de 1 M de iones. El electrodo de referencia suele ser un metal inerte como el platino que conduce electrones, pero no reacciona con el electrolito. El uso de una solución de 1 M de iones de hidrógeno (H^+) con el electrodo de referencia es común. La reacción que ocurre en este electrodo de hidrógeno es $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow$. El gas H_2 es suministrado al electrodo de hidrógeno. Una celda electroquímica como ésta se conoce como celda estándar cuando las mediciones se hacen a 25°C y a presión atmosférica con concentraciones de electrolito de 1 M. Los dos electrolitos están en contacto eléctrico, pero no se les permite mezclarse entre sí. Cada uno de los electrodos establece su propio potencial de electrodo. Al medir el voltaje entre los dos electrodos cuando se abre el circuito, se obtiene la diferencia de potencial. El potencial del electrodo del hidrógeno se hace de manera arbitraria igual a cero volts. Si el metal tiene una mayor tendencia a ceder electrones que el electrodo del hidrógeno, entonces el potencial del metal es negativo, es decir, el metal es anódico con respecto al electrodo de hidrógeno. Si el potencial del metal es positivo, el metal es catódico con respecto al electrodo de hidrógeno.

La **serie de fuerzas electromotrices** (o **fem**) que se muestran en la tabla 23-1 compara el potencial estándar del electrodo E^0 para cada uno de los metales con el del electrodo de hidrógeno bajo condiciones estándar de 25°C y una solución de 1 M de iones en el electrolito. Observe que la medición del potencial se realiza cuando el circuito eléctrico está abierto. La diferencia de voltaje comienza a cambiar tan pronto como se cierre el circuito.

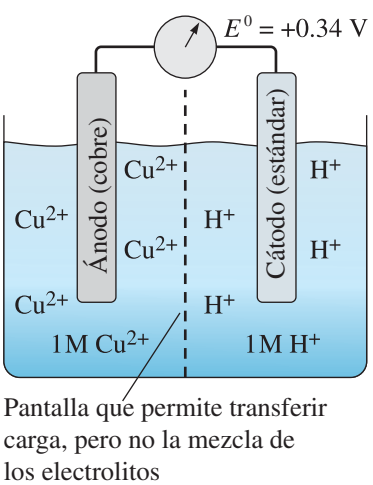


Figura 23-5 Semicelda empleada para medir el potencial del electrodo de cobre bajo condiciones estándar. El potencial del electrodo de cobre es la diferencia de potencial entre éste y el electrodo estándar de hidrógeno en un circuito abierto. Como E^0 es mayor de cero, el cobre es catódico en comparación con el electrodo de hidrógeno.

Tabla 23-1 Potenciales estándar de reducción para elementos y reacciones seleccionados

	Metal	Potencial del electrodo E^0 (volts)
Anódico ↑	$Li^+ + e^- \rightarrow Li$	−3.05
	$Mg^{2+} + 2e^- \rightarrow Mg$	−2.37
	$Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$	−1.66
	$Ti^{2+} + 2e^- \rightarrow Ti$	−1.63
	$Mn^{2+} + 2e^- \rightarrow Mn$	−1.63
	$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	−0.76
	$Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr$	−0.74
	$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	−0.44
	$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	−0.25
	$Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$	−0.14
	$Pb^{2+} + 2e^- \rightarrow Pb$	−0.13
	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0.00 — (definido)
	$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	+0.34
↓	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$	+0.40
	$Ag^+ + e^- \rightarrow Ag$	+0.80
	$Pt^{4+} + 4e^- \rightarrow Pt$	+1.20
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+1.23
Catódico	$Au^{3+} + 3e^- \rightarrow Au$	+1.50

Cuanto más negativo sea el valor del potencial para la oxidación del metal, más electropositivo es el metal; esto significa que el metal tendrá una tendencia más alta a experimentar la reacción de oxidación. Por ejemplo, los álcalis y los metales de tierras alcalinas (por ejemplo, Li, K, Ba, Sr y Mg) son tan reactivos que se deben conservar bajo condiciones que impidan cualquier contacto con el oxígeno. Por el contrario, los metales que están hacia la parte inferior de la gráfica (por ejemplo, Ag, Au y Pt) no tenderán a reaccionar con el oxígeno. Esta es la razón por la cual se conocen como "metales nobles". Los metales como el Fe, Cu y Ni tienen reactividades intermedias, pero éste no es el único aspecto a considerar. El aluminio, por ejemplo, tiene un potencial estándar de electrodo fuertemente negativo y reacciona con gran facilidad con el oxígeno para formar óxido de aluminio; también reacciona con facilidad con el flúor para formar fluoruro de aluminio. Estos dos compuestos forman una capa tenaz e impenetrable que ayuda a detener cualquier corrosión adicional. El titanio también reacciona con facilidad con el oxígeno. El óxido de titanio rápidamente formado crea una barrera que impide la difusión adicional de las especies y, por lo tanto, evita la oxidación adicional. Esta es la razón por la cual tanto el aluminio como el titanio son muy reactivos, pero pueden resistir excepcionalmente bien la corrosión. Observe que la serie fem indica la factibilidad termodinámica y la fuerza de activación, pero *no* dice nada respecto a la cinética de la reacción.

Efecto de la concentración sobre el potencial del electrodo

El potencial del electrodo depende de la concentración del electrolito. A 25°C, la **ecuación de Nernst** proporciona el potencial del electrodo en soluciones no estándar:

$$E = E^0 + \frac{0.0592}{n} \log (C_{\text{ion}}) \tag{23-9}$$

donde E es el potencial del electrodo en una solución con una concentración C_{ion} del metal en unidades molares, n es la carga en el ion metálico y E_0 es el potencial estándar del electrodo en una solución 1 M. Observe que cuando $C_{\text{ion}} = 1\text{M}$, $E = E^0$. El ejemplo que sigue ilustra el cálculo del potencial del electrodo.

Ejemplo 23-1 *Potencial de semicelda para el cobre*

Suponga que se disuelve 1 g de cobre como Cu^{2+} en 1000 g de agua para producir un electrolito. Calcule el potencial del electrodo de la semicelda de cobre dentro de ese electrolito. Suponga $T = 25°C$.

SOLUCIÓN

De la química se sabe que se obtiene una solución 1 M estándar de Cu^{2+} cuando se agrega 1 mol de Cu^{2+} (una cantidad igual a la masa atómica del cobre) a 1000 g de agua. La masa atómica del cobre es 63.55 g/mol. La concentración de la solución cuando sólo se agrega 1 g debe ser

$$C_{\text{ion}} = \frac{1}{63.55} = 0.0157\,\text{M}$$

De la ecuación de Nernst, con $n = 2$ y $E^0 = +0.34$ V,

$$E = E^0 + \frac{0.0592}{n}\log(C_{\text{ion}}) = 0.34 + \frac{0.0592}{2}\log(0.0157)$$
$$= 0.34 + (0.0296)(-1.80) = 0.29\,\text{V}$$

Rapidez de corrosión o de chapado

La cantidad de metal depositado en el cátodo en el electrochapado, o eliminado del ánodo por corrosión, pueden determinarse a partir de la **ecuación de Faraday**,

$$w = \frac{ItM}{n\text{F}} \tag{23-10}$$

donde w es el peso depositado o corroído (g), I la corriente (A), M la masa atómica del metal (g/mol), n la carga en el ion metálico, t el tiempo (s) y F la constante de Faraday (96,500 C/mol). El producto It (con unidades de C) es la carga total que se remueve del ánodo y se transfiere al cátodo. La cantidad nF/M es la carga del material considerado por gramo. Por lo tanto, la razón entre estos términos es la masa depositada o corroída del material. En otras palabras, esta ley básicamente indica que un gramo equivalente de un metal será depositado por 96,500 C de carga. A menudo la corriente se expresa en términos de la densidad de corriente, $i = I/A$, de modo que la ecuación 23-10 se convierte en

$$w = \frac{iAtM}{n\text{F}} \tag{23-11}$$

donde el área A es el área superficial del ánodo o el cátodo.

Los siguientes ejemplos ilustran el uso de la ecuación de Faraday para calcular la densidad de corriente.

Ejemplo 23-2 *Diseño de un proceso de chapado de cobre*

Diseñe un proceso para el electrochapado de una capa de 0.1 cm de grueso de cobre en una superficie de cátodo de 1 cm × 1 cm.

SOLUCIÓN

Para producir una capa de 0.1 cm de grueso en un área superficial de 1 cm^2, la masa del cobre debe ser

$$\rho_{\text{Cu}} = 8.93\ \text{g/cm}^3 \quad A = 1\ \text{cm}^2$$

$$\text{Volumen de cobre} = (1\ \text{cm}^2)(0.1\ \text{cm}) = 0.1\ \text{cm}^3$$
$$\text{Masa de cobre} = (8.93\ \text{g/cm}^3)(0.1\ \text{cm}^3) = 0.893\ \text{g}$$

De la ecuación de Faraday, donde $M_{Cu} = 63.55$ g/mol y $n = 2$:

$$It = \frac{wn\,\text{F}}{M} = \frac{(0.893\ \text{g})(2)(96{,}500\ \text{C/mol})}{(63.55\ \text{g/mol})} = 2712\ \text{A} \cdot \text{s}$$

Por lo tanto, se podrían usar varias combinaciones diferentes de corriente y tiempo para producir la placa de cobre:

Corriente	Tiempo
0.1 A	27,120 s = 7.5 h
1.0 A	2,712 s = 45 min
10.0 A	271.2 s = 4.5 min
100.0 A	27.12 s = 0.45 min

La opción de la combinación exacta de corriente y tiempo podría hacerse con base en la rapidez de producción y la calidad del cobre chapado. Corrientes bajas requieren tiempos muy largos de chapado, quizás haciendo así que el proceso sea económicamente no rentable. Por su parte, las corrientes altas pueden reducir la eficiencia del chapado. La eficacia del chapado puede depender de la composición del electrolito que contenga los iones de cobre, así como de cualesquiera impurezas o aditivos que estén presentes. Corrientes de 10 o 100 A son demasiado altas; pueden iniciar otras reacciones laterales que no son deseables. El depósito también puede no ser uniforme y liso. Es posible que sean necesarios más conocimientos y experimentación para obtener el proceso de chapado más económico y eficiente. Una corriente de ~1 A y un tiempo de ~45 minutos no son raros en operaciones de chapado.

Ejemplo 23-3 *Corrosión del hierro*

Un recipiente de hierro de 10 cm × 10 cm de base contiene un líquido corrosivo hasta una altura de 20 cm. Como resultado de una celda electrolítica se produce una corriente y, después de cuatro semanas, el recipiente ha disminuido 70 g en peso. Calcule *a*) la corriente y *b*) la densidad de corriente que interviene en la corrosión del hierro.

SOLUCIÓN

a) El tiempo total de exposición es

$$t = (4\ \text{sem})(7\ \text{d/sem})(24\ \text{h/d})(3600\ \text{s/h}) = 2.42 \times 10^6\ \text{s}$$

De la ecuación de Faraday, usando $n = 2$ y $M = 55.847$ g/mol,

$$I = \frac{wn\text{F}}{tM} = \frac{(70\ \text{g})(2)(96{,}500\ \text{C/mol})}{(2.42 \times 10^6\ \text{s})(55.847\ \text{g/mol})}$$
$$= 0.1\ \text{A}$$

b) El área superficial total del hierro en contacto con el líquido corrosivo y la densidad de corriente son

$$A = (4\ \text{lados})(10\ \text{cm} \times 20\ \text{cm}) + (1\ \text{fondo})(10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}) = 900\ \text{cm}^2$$
$$i = \frac{I}{A} = \frac{0.1\ \text{A}}{900\ \text{cm}^2} = 1.11 \times 10^{-4}\ \text{A/cm}^2$$

Ejemplo 23-4 ***Celda de corrosión de cobre-zinc***

Suponga que en una celda de corrosión compuesta de cobre y zinc, la densidad de corriente en el cátodo de cobre es 0.05 A/cm^2. El área de los electrodos de cobre y de zinc es de 100 cm^2. Calcule *a*) la corriente de corrosión, *b*) la densidad de corriente en el ánodo de zinc y *c*) la pérdida de zinc por hora.

SOLUCIÓN

a) La corriente de corrosión es

$$I = i_{Cu}A_{Cu} = (0.05\ \text{A/cm}^2)(100\ \text{cm}^2) = 5\ \text{A}$$

b) La corriente en la celda es la misma en todas partes. Así,

$$i_{Zn} = \frac{I}{A_{Zn}} = \frac{5\ \text{A}}{100\ \text{cm}^2} = 0.05\,\text{A/cm}^2$$

c) La masa atómica del zinc es 65.38 g/mol y hay 3600 segundos en una hora. De la ecuación de Faraday:

$$w_{Zn} = \frac{ItM}{nF} = \frac{(5\ \text{A})(3600\,\text{s})(65.38\,\text{g/mol})}{(2)(96{,}500\,\text{C/mol})} = 6.1\ \text{g}$$

23-4 Corriente de corrosión y polarización

Para proteger de la corrosión a los metales, es deseable que la corriente sea lo más pequeña posible. Desafortunadamente, la corriente de corrosión es muy difícil de medir, controlar o predecir. Parte de esta dificultad puede atribuirse a diversos cambios que ocurren durante la operación de la celda de corrosión. Un cambio en el potencial de un ánodo o cátodo, que a su vez afecta la corriente de la celda, se denomina **polarización**, de la cual hay tres clases importantes: 1) activación, 2) concentración y 3) polarización de resistencia.

Polarización de activación

Esta clase de polarización está relacionada con la energía necesaria para que ocurran reacciones anódicas o catódicas. Si se puede incrementar el grado de polarización, estas reacciones ocurren con mayor dificultad y se reduce la rapidez de corrosión. Pequeñas diferencias en composición y estructura en los materiales del ánodo y cátodo cambian considerablemente la polarización de activación. Los efectos de segregación en los electrodos causan que la polarización de activación varíe de un lugar a otro. Estos factores hacen difícil predecir la corriente de corrosión.

Polarización de concentración

Una vez que se inicia la corrosión, pueden cambiar las concentraciones de iones en la superficie del ánodo o del cátodo. Por ejemplo, puede haber una mayor concentración de iones metálicos en el ánodo si los iones no pueden difundirse con rapidez en el electrolito. Los iones de hidrógeno pueden agotarse en el cátodo en el caso de un electrodo de hidrógeno, o se puede presentar una alta concentración de $(OH)^-$ en el cátodo en el caso de un electrodo de oxígeno. Cuando esto ocurre, la reacción anódica o la catódica se sofoca debido a que se liberan menos electrones en el ánodo o se aceptan en el cátodo.

En cualquiera de estos ejemplos, la densidad de corriente y, por lo tanto, la rapidez de corrosión, disminuye debido a la polarización de concentración. Por lo general, la polarización es menos pronunciada cuando el electrolito está muy concentrado, la temperatura se incrementa o el electrolito es agitado vigorosamente. Cada uno de estos factores aumenta la densidad de corriente y estimula la corrosión electroquímica.

Polarización de resistencia

Este tipo de polarización se presenta por la resistividad eléctrica del electrolito. Si se presenta una mayor resistencia al flujo de la corriente, la rapidez de corrosión se reduce. De nuevo, el grado de polarización de resistencia puede cambiar cuando cambia la composición del electrolito durante el proceso de corrosión.

23-5 Tipos de corrosión electroquímica

En esta sección se verán algunas de las formas más comunes que presenta la corrosión electroquímica. En primer término, se desarrolla un *ataque uniforme*. Cuando un metal se coloca en un electrolito, algunas regiones resultan anódicas con respecto a otras; además, la ubicación de estas regiones cambia y hasta se invierte en ocasiones. Como las regiones anódicas y catódicas cambian continuamente, el metal se corroe de manera uniforme.

El *ataque galvánico* se presenta cuando ciertas áreas actúan siempre como ánodos, mientras que otras actúan siempre como cátodos. Estas celdas electroquímicas se denominan celdas galvánicas y pueden separarse en tres tipos: **celdas de composición**, **celdas de esfuerzo** y **celdas de concentración**.

Celdas de composición

Las celdas de composición, o *corrosión metálica disímil*, aparecen cuando dos metales o aleaciones, por ejemplo cobre y hierro, forman una celda electrolítica. Debido al efecto de los elementos de aleación y de las concentraciones del electrolito en la polarización, las series fem pueden no decir cuáles regiones se corroen y cuáles están protegidas. En cambio, se usa una serie galvánica, en la que se clasifican las diferentes aleaciones en función de sus tendencias anódicas y catódicas en un ambiente determinado (tabla 23-2). Se puede hallar una serie galvánica diferente para el agua de mar, el agua dulce y las atmósferas industriales.

Tabla 23-2 Serie galvánica para el agua de mar

Extremo anódico, activo	Aleaciones de magnesio y Mg
	Zinc
	Acero galvanizado
	Aluminio 5052
	Aluminio 3003
	Aluminio 1100
	Alclad
	Cadmio
	Aluminio 2024
	Acero al bajo carbono
	Hierro fundido
	Soldadura 50% Pb-50% Sn
	Acero inoxidable 316 (activo)
	Plomo
	Estaño
	Latón Cu-40% Zn
	Aleaciones base de níquel (activas)
	Cobre
	Aleación Cu-30% Ni
	Aleaciones base de níquel (pasivas)
	Aceros inoxidables (pasivos)
	Plata
	Titanio
	Grafito
	Oro
	Platino
Extremo catódico, noble	

(Basada en ASM Metals Handbook, *vol. 10, 8a. ed., ASM International, 1975.)*

Ejemplo 23-5 *Corrosión de un acoplamiento de latón soldado*

Un acoplamiento de latón utilizado en una aplicación marina se une con soldadura de plomo y estaño. ¿Sufrirá corrosión el latón o la soldadura?

SOLUCIÓN

De la serie galvánica, se encuentra que todas las aleaciones base de cobre son más catódicas que una soldadura 50% Pb-50% Sn. Entonces, la soldadura es el ánodo y se corroe. Del mismo modo, la corrosión de la soldadura puede contaminar con plomo el agua de los sistemas de tuberías de agua potable.

Las celdas de composición también se desarrollan en aleaciones de dos fases, donde una fase es más anódica que la otra. Como la ferrita es anódica con respecto a la cementita en el acero, pequeñas microceldas hacen que el acero se corroa galvánicamente (figura 23-6). Casi siempre, una aleación de dos fases tiene menos resistencia a la corrosión que una aleación de una sola fase de composición similar.

La **corrosión intergranular** se presenta cuando el precipitado de una segunda fase o la segregación en los límites de grano producen una celda galvánica. Por ejemplo, en las aleaciones de zinc, impurezas como el cadmio, estaño y plomo se segregan en los límites de grano durante la solidificación. Los límites de grano son anódicos en comparación con el resto de los granos, por lo que presentan corrosión del metal en el límite de granos (figura 23-7). En aceros inoxidables austeníticos,

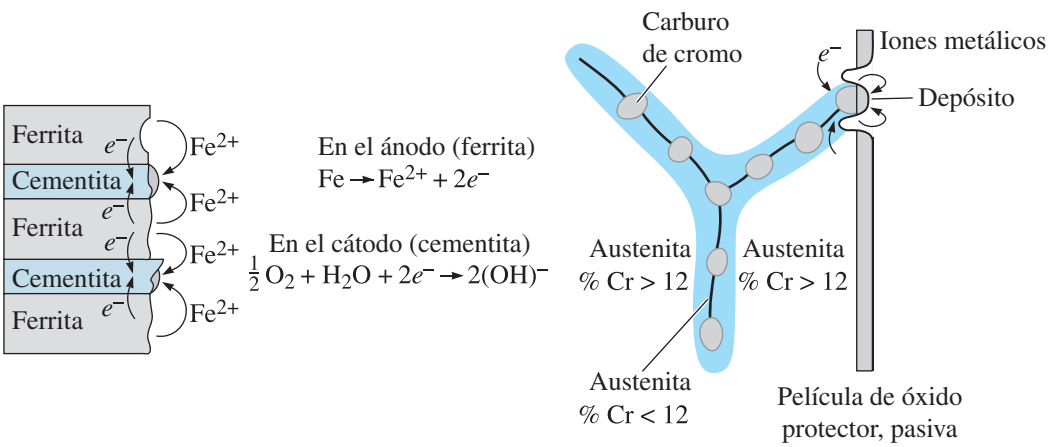


Figura 23-6 Ejemplo de celdas microgalvánicas en aleaciones de dos fases: *a*) En acero, la ferrita es anódica con respecto a la cementita. *b*) En acero inoxidable austenítico, la precipitación del carburo de cromo hace que sea anódica la austenita baja en Cr en los límites de grano.

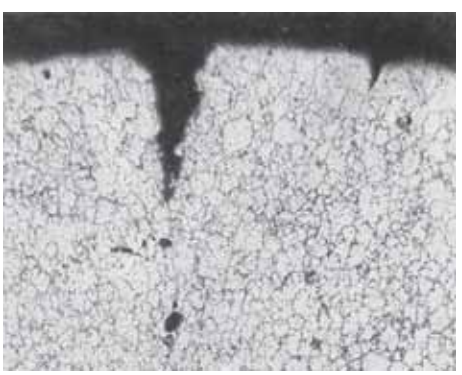


Figura 23-7 Microfotografía de corrosión intergranular en una pieza de zinc colada en matriz. La segregación de impurezas en los bordes de grano produce celdas de corrosión microgalvánicas (50 ×). (*Reimpresa por cortesía de Don Askeland.*)

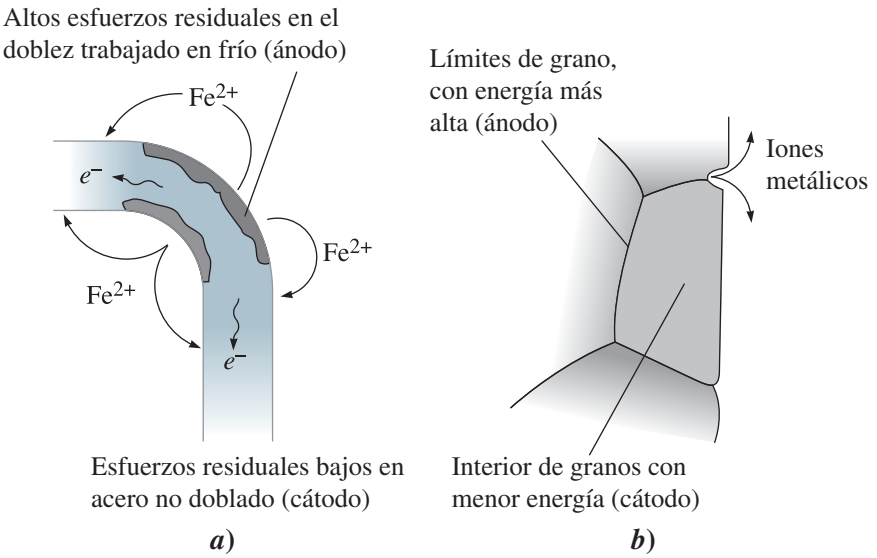


Figura 23-8 Ejemplos de celdas de esfuerzo. *a*) El trabajo en frío necesario para doblar una barra de acero introduce altos esfuerzos residuales en el doblez, que entonces es anódico y se corroe. *b*) Como los límites de grano tienen gran energía, son anódicos y se corroen.

los carburos de cromo pueden precipitarse en los límites de grano [figura 23-6*b*)]. La formación de los carburos elimina cromo proveniente de la austenita adyacente a los límites. La austenita de bajo cromo (<12% Cr) en los límites de grano es anódica con respecto al resto de los granos y se presenta corrosión en dichos límites. En ciertas aleaciones de aluminio trabajadas en frío, los límites de grano se corroen rápidamente debido a la presencia de precipitados perjudiciales. Esto hace que los granos de aluminio se desprendan como páginas u hojas de un libro, lo cual se conoce como exfoliación.

Celdas de esfuerzo

Estas celdas se forman cuando un metal contiene regiones con diferentes esfuerzos locales. Las regiones con esfuerzos más altos o de más alta energía actúan como ánodos con respecto a las áreas catódicas de menos esfuerzos (figura 23-8). Las regiones con tamaño de grano más pequeño, o de densidad más alta de límites de grano, son anódicas con respecto a las regiones de granos gruesos del mismo material. Las áreas fuertemente trabajadas en frío son anódicas con respecto a las áreas menos trabajadas en frío.

La **corrosión por esfuerzo** se presenta por acción galvánica, pero también pueden presentarse otros mecanismos, como la adsorción de impurezas en la punta de una grieta existente. Ocurre una falla como resultado de corrosión y un esfuerzo aplicado. Mayores esfuerzos aplicados reducen el tiempo necesario para que se presente una falla.

Las fallas por fatiga también se inician o aceleran cuando hay corrosión. La *corrosión por fatiga* puede reducir las propiedades de fatiga al iniciar grietas (quizás al producir pequeñas hendiduras o huecos) y al incrementar la rapidez a la que se propagan las grietas.

Ejemplo 23-6 *Corrosión de acero estirado en frío (trefilado)*

Un alambre de acero estirado en frío, se procesa para formar un clavo por deformación adicional, produciendo la punta en un extremo y la cabeza en el otro. ¿Dónde ocurrirá la corrosión más severa del clavo?

SOLUCIÓN

Como la cabeza y la punta han sido trabajadas en frío una mayor cantidad en comparación con el cuerpo del clavo, la cabeza y la punta sirven como ánodos y se corroen más rápidamente.

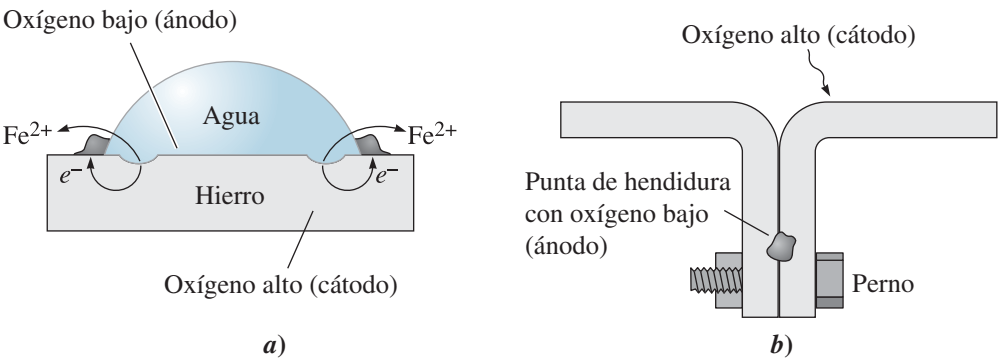


Figura 23-9 Celdas de concentración: *a*) Se presenta corrosión bajo una pequeña gota de agua en una placa de acero debido a la baja concentración de oxígeno en el agua. *b*) Se presenta corrosión en la punta de una hendidura por el limitado acceso a oxígeno.

Celdas de concentración

Las celdas de concentración aparecen debido a diferencias en la concentración del electrolito (figura 23-9). Con base en la ecuación de Nernst, una diferencia en la concentración de iones metálicos produce una diferencia en el potencial del electrodo. El metal en contacto con la solución más concentrada es el cátodo; el metal en contacto con la solución diluida es el ánodo.

La celda de concentración de oxígeno (a veces conocida como **escasez de oxígeno**) se presenta cuando la reacción catódica es el electrodo del oxígeno, $H_2O + \frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$. Los electrones fluyen de la región de bajo oxígeno, que sirve como el ánodo, a la región de alto oxígeno, que sirve como el cátodo.

Los depósitos, por ejemplo la herrumbre o las gotas de agua, protegen del oxígeno al metal base. En consecuencia, el metal bajo el depósito es el ánodo y se corroe. Esto causa una forma de corrosión por picaduras. La corrosión en la línea de flotación de embarcaciones es semejante. El metal arriba de la superficie del agua está expuesto al oxígeno, en tanto que el que está debajo de la línea del agua está privado de oxígeno; por lo tanto, se corroe el metal bajo la superficie. Por lo general, el metal muy alejado de la superficie del agua se corroe con más lentitud que el metal que está apenas bajo la superficie del agua debido a las diferencias en la distancia que deben recorrer los electrones. Puesto que las grietas y hendiduras tienen una menor concentración de oxígeno que la correspondiente base metálica, la punta de una grieta o hendidura es el ánodo, provocando **corrosión por hendidura**.

Las tuberías enterradas pueden corroerse por las diferencias en la composición del suelo. Las diferencias en rapidez pueden provocar diferencias de concentración. El agua estancada contiene bajas concentraciones de oxígeno, mientras que las aguas de rápido movimiento y ventiladas contienen altas concentraciones de oxígeno. El metal cercano a aguas estancadas es anódico y se corroe. El siguiente es un ejemplo de corrosión debido al agua.

Ejemplo 23-7 *Corrosión de acero engarzado*

Dos piezas de metal se unen mecánicamente al engarzar sus bordes. ¿Por qué sería esto una mala idea si el acero se expone al agua? Si el agua contiene sal, ¿se afectaría la corrosión?

SOLUCIÓN

Al engarzar los bordes de acero, se produce una hendidura. La región en la hendidura está expuesta a menos aire y humedad, de modo que se comporta como el ánodo en una celda de concentración. El acero en la hendidura se corroe.

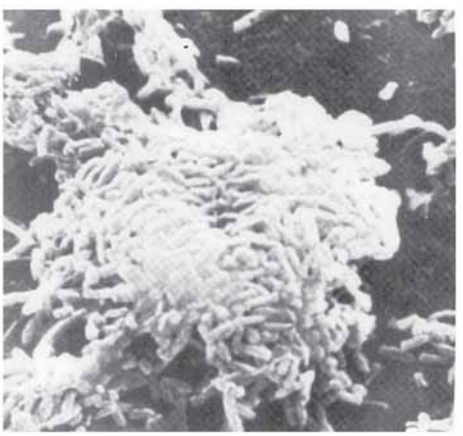
La sal incrementa la conductividad del agua, permitiendo que cargas eléctricas se transfieran con más rapidez. Esto provoca una más alta densidad de corriente y, por lo tanto, más rápida corrosión debido a la menor polarización de resistencia.

Corrosión microbiana

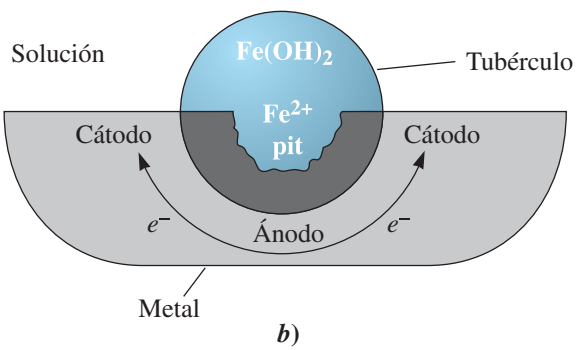
Varios microbios, por ejemplo hongos y bacterias, crean condiciones que estimulan la corrosión electroquímica. Especialmente en ambientes acuosos, estos organismos crecen en superficies metálicas y por lo general forman colonias que no son continuas. La presencia de colonias y los productos derivados del crecimiento de los organismos produce cambios en el ambiente y, por lo tanto, la rapidez a la que se presenta la corrosión.

Algunas bacterias reducen sulfatos en el ambiente, produciendo ácido sulfúrico, que a su vez ataca al metal. Las bacterias pueden ser aeróbicas (que se desarrollan cuando hay oxígeno) o anaeróbicas (que no necesitan oxígeno para crecer). Estas bacterias causan ataques en diversos metales, incluyendo aceros, aceros inoxidables, aluminio y cobre, así como en algunos materiales cerámicos y en el concreto. Un ejemplo común se presenta en tanques de aluminio para combustible de aviones. Cuando el combustible, por lo general queroseno, está contaminado con humedad, crecen bacterias y excretan ácidos, los cuales atacan al aluminio, que en última instancia provocan que el tanque de combustible tenga fugas.

El crecimiento de colonias de organismos en una superficie metálica lleva a la formación de celdas de concentración de oxígeno (figura 23-10). Las áreas bajo las colonias son anódicas, en tanto que las áreas no afectadas son catódicas. Además, las colonias de organismos reducen la rapidez de difusión del oxígeno hacia el metal, y los organismos tienden a consumir el oxígeno incluso si el oxígeno se difunde en la colonia. La celda de concentración produce fosas bajo las regiones cubiertas con los organismos. El crecimiento de los organismos, que puede incluir productos de la corrosión del metal, produce acumulaciones (llamadas **tubérculos**) que pueden obstruir tuberías o tapar sistemas de enfriamiento de agua en reactores nucleares, submarinos o reactores químicos.



a)



b)

Figura 23-10 *a*) Celdas bacterianas que crecen en una colonia (2700 ×). *b*) Formación de un tubérculo y una fosa bajo una colonia biológica. (*Microfotografía reimpresa por cortesía de Donald Askeland.*)

23-6 Protección contra corrosión electroquímica

Para combatir la corrosión, se utilizan diversas técnicas, como el diseño y la selección de materiales y el uso de recubrimientos, inhibidores, protección catódica y pasivación (estabilización).

Diseño Un adecuado diseño de estructuras metálicas puede hacer que la corrosión sea más lenta o incluso evitarla. Algunos de los pasos que deben darse para combatir la corrosión son los siguientes:

1. Impedir la formación de celdas galvánicas. Esto puede lograrse utilizando metales o aleaciones semejantes. Por ejemplo, es frecuente que tuberías de acero se conecten con conexiones de latón; esto produce una celda galvánica que hace que el acero se corroa. Con el uso de conexiones intermedias de plástico para aislar eléctricamente el acero y el latón, este problema puede reducirse al mínimo.
2. Hacer que el área del ánodo sea mucho mayor que el área del cátodo. Por ejemplo, pueden usarse remaches de cobre para sujetar láminas de acero. Debido a la pequeña área de los remaches de cobre, ocurre una reacción catódica limitada. El cobre acepta pocos electrones y la reacción anódica del acero continúa con lentitud. Por el contrario, si se usan remaches de acero para unir láminas de cobre, la pequeña área del ánodo de acero cede muchos electrones que son aceptados por el área grande del cátodo de cobre; la corrosión de los remaches de acero es muy rápida. Esto queda ilustrado en el siguiente ejemplo.
3. Diseñe los componentes de modo que los sistemas de fluidos estén cerrados, no abiertos, para que no se acumulen charcos de agua estancada. Los depósitos parcialmente llenos sufren de corrosión por líneas de agua. Los sistemas abiertos disuelven continuamente gases, produciendo iones que participan en la reacción catódica y estimulan las celdas de concentración.
4. Evite hendiduras entre materiales ensamblados o unidos (figura 23-11). La soldadura puede ser una mejor técnica de unión que la soldadura fuerte, soldadura blanda o sujeción mecánica. Las celdas galvánicas se forman en la soldadura fuerte o soldadura blanda porque los metales de relleno tienen diferente composición a la del metal que se une. Los sujetadores mecánicos producen hendiduras generadas por celdas de concentración. Si el metal de relleno es muy semejante al metal base, la soldadura puede impedir la formación de estas celdas.

Ejemplo 23-8 *Efecto de las áreas sobre la rapidez de corrosión para el par cobre-zinc*

Considere un par de corrosión cobre-zinc. Si la densidad de corriente en el cátodo de cobre es de 0.05 A/cm^2, calcule la pérdida de peso del zinc por hora si 1) el área catódica del cobre es de 100 cm^2 y el área anódica del zinc es de 1 cm^2 y 2) el área catódica del cobre es de 1 cm^2 y el área anódica del zinc es de 100 cm^2.

SOLUCIÓN

Del ejemplo 23-4 sabemos que la cantidad perdida de zinc en el ánodo del área anódica pequeña del zinc es

$$w_{Zn} = 6.1\text{g}$$

Para el área anódica grande del zinc,

$$I = i_{Cu}A_{Cu} = (0.05\,\text{A/cm}^2)(1\,\text{cm}^2) = 0.05\ \text{A}$$

$$w_{Zn} = \frac{ItM}{nF} = \frac{(0.05\,\text{A})(3600\,\text{s})(65.38\ \text{g/mol})}{(2)(96{,}500\,\text{C/mol})} = 0.061\ \text{g}$$

La rapidez de corrosión del zinc se reduce considerablemente cuando el ánodo de zinc es mucho mayor que el cátodo.

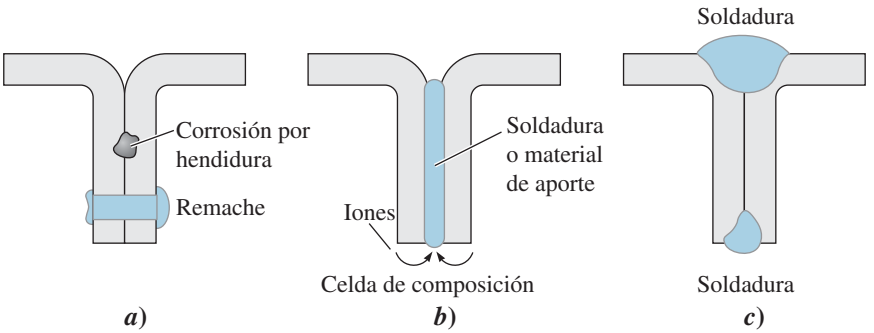


Figura 23-11 Métodos alternos para unir dos piezas de acero: *a*) Los remaches pueden producir una celda de concentración, *b*) la soldadura con y sin aporte puede producir una celda de composición, y *c*) la soldadura con metal de relleno comparable al metal base puede evitar la formación de celdas galvánicas.

5. En algunos casos, la rapidez de corrosión no puede reducirse a un nivel que no interfiera con la duración esperada del componente. En tales casos, el ensamble debe estar diseñado de forma tal que la parte corroída pueda cambiarse fácil y económicamente.

Recubrimientos

Los recubrimientos se usan para aislar las regiones anódicas y catódicas; también impiden la difusión de oxígeno o de vapor de agua que inicia la corrosión u oxidación. Los recubrimientos temporales, por ejemplo grasa o aceite, dan un poco de protección pero se disgregan con facilidad. Los recubrimientos orgánicos, como es el caso de pinturas, o de recubrimientos cerámicos, como esmaltes o vidrios, dan mejor protección, pero si el recubrimiento se disgrega, queda expuesto un pequeño lugar anódico que queda sometido a una corrosión rápida y localizada.

Los recubrimientos metálicos incluyen el acero estañado y galvanizado por inmersión en caliente (recubrimiento de zinc) (figura 23-12). Un recubrimiento continuo de un metal aísla al acero del electrolito; no obstante, cuando el recubrimiento sufre raspaduras, lo cual expone al acero base, el zinc continúa siendo efectivo porque es anódico al acero. Como el área del cátodo de acero expuesto es pequeña, el recubrimiento de zinc se corroe con gran lentitud y el acero permanece protegido. En contraste, el acero es anódico con respecto al estaño, de modo que se forma un pequeño ánodo de acero cuando se raspa el estaño, y posteriormente ocurre una rápida corrosión del acero.

Las capas de óxido estables, adherentes, no porosas, no conductoras se forman en la superficie de aluminio, cromo y acero inoxidable. Estos óxidos excluyen el electrolito e impiden la formación de celdas galvánicas. Componentes como los recipientes de reacción también se pueden recubrir con Teflón^{MR} resistente a la corrosión o con otros plásticos.

Inhibidores

Cuando se agregan al electrolito, algunos productos químicos emigran de preferencia hacia la superficie anódica o catódica produciendo polarización por concentración o por resistencia, es decir, son **inhibidores**. Las sales de cromato desempeñan esta función en radiadores de automóviles.

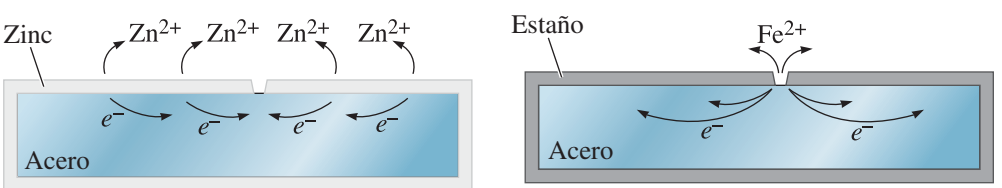


Figura 23-12 El acero recubierto con zinc y el acero estañado están protegidos de diferentes maneras. El zinc protege al acero incluso cuando desaparece el recubrimiento, dado que el zinc es anódico con respecto al acero. El estaño no protege al acero cuando el recubrimiento se disgrega porque el acero es anódico con respecto al estaño.

Una diversidad de cromatos, fosfatos, molibdatos y nitritos producen películas protectoras en ánodos y cátodos en plantas de energía eléctrica y en intercambiadores de calor, "ahogando" así la celda electroquímica. Aun cuando el contenido exacto y el mecanismo por los que funciona no están claros, el conocido lubricante WD-40^{MR} funciona por la acción de inhibidores. El nombre "WD-40^{MR}" significa "desplazamiento de agua" (de *water displacement,* WD) que funcionó en el intento experimental número 40.

Protección catódica

Se puede dar protección contra la corrosión si se suministran electrones al metal y se fuerza al metal a ser el cátodo (figura 23-13). La protección catódica puede utilizar un ánodo de sacrificio o un voltaje aplicado.

Un **ánodo de sacrificio** se une al material que ha de protegerse, formándose así un circuito electroquímico. El ánodo de sacrificio se corroe, cede electrones al metal y con ello impide una reacción anódica en el metal. El ánodo de sacrificio, por lo general de zinc o de magnesio, se consume y en última instancia debe ser cambiado. Entre sus aplicaciones se cuenta impedir la corrosión de tuberías enterradas, barcos, plataformas de perforación marinas y calentadores de agua. Una varilla de magnesio se usa en muchos calentadores de agua. El Mg sirve como ánodo y experimenta disolución, protegiendo así al acero contra la corrosión.

Se obtiene un **voltaje aplicado** de una fuente de corriente directa conectada entre un ánodo auxiliar y el metal a proteger. En esencia, se ha conectado una batería de modo que los electrones se muevan hacia el metal, provocando que éste sea el cátodo. El ánodo auxiliar, por ejemplo chatarra de hierro, se corroe.

Protección anódica o pasivación

Los metales situados cerca del extremo anódico de la serie galvánica son activos y sirven como ánodos en casi todas las celdas electrolíticas; no obstante, si se hace que estos metales sean más pasivos o más catódicos, se corroen con más lentitud de la normal. La **pasivación** resulta si se produce una fuerte polarización anódica que impida la reacción anódica normal; de aquí el término de protección anódica.

La pasivación se produce al exponer el metal a soluciones oxidantes altamente concentradas. Si una pieza de hierro se sumerge en un ácido nítrico muy concentrado, se corroe de forma rápida y uniforme para formar una delgada capa protectora de hidróxido de hierro. La capa protege al hierro de más corrosión en ácido nítrico.

También se puede generar pasivación si se incrementa el potencial en el ánodo arriba de un nivel crítico. Se forma una película pasiva en la superficie del metal, provocando una fuerte polarización anódica, y la corriente disminuye a un nivel muy bajo. La pasivación del aluminio recibe el nombre de **anodizado**, y se produce una gruesa capa de óxido, la cual se puede teñir para obtener colores atractivos. La capa de óxido de Ta_2O_5 formada en alambres de tantalio se usa para fabricar capacitores.

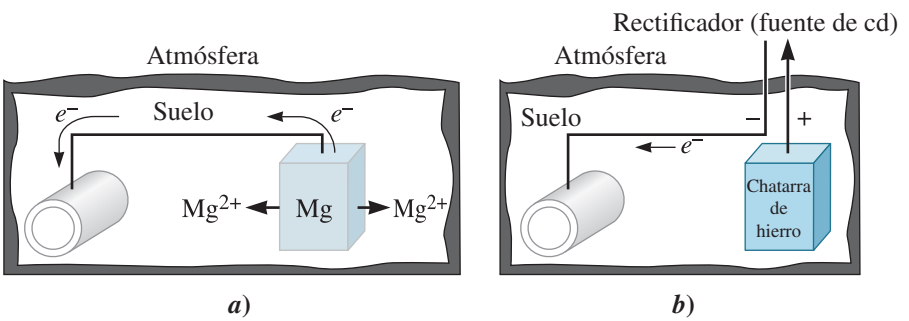


Figura 23-13 Protección catódica de una tubería de acero bajo tierra: *a*) Un ánodo de sacrificio construido de magnesio asegura que la celda galvánica haga que la tubería sea el cátodo. *b*) Un voltaje aplicado entre un ánodo auxiliar de chatarra de hierro y la tubería asegura que ésta sea el cátodo.

Selección y tratamiento de materiales

La corrosión puede evitarse o reducirse al mínimo si se seleccionan materiales y tratamientos térmicos apropiados. En piezas de fundición, por ejemplo, la segregación produce celdas galvánicas localizadas, muy pequeñas, que aceleran la corrosión. Se puede mejorar la resistencia a la corrosión con un tratamiento térmico de homogeneización. Cuando se fabrican metales en formas terminadas por dobleces, las diferencias en la cantidad de trabajo en frío y los esfuerzos residuales generan celdas de esfuerzo locales. Éstas se pueden reducir al mínimo por medio de un recocido de alivio de esfuerzos o un recocido completo de recristalización.

El tratamiento térmico es particularmente importante en aceros inoxidables austeníticos (figura 23-14). Cuando el acero se enfría lentamente de 870 a 425°C, los carburos de cromo se precipitan en los límites de grano. En consecuencia, la austenita en los límites de grano puede contener menos de 12% de cromo, que es el mínimo requerido para producir una capa pasiva de óxido. El acero queda **sensibilizado**. Como las regiones del límite de grano son pequeñas y altamente anódicas, se presenta una rápida corrosión de la austenita en los límites de grano. Por medio de varias técnicas se puede reducir al mínimo el problema.

1. Si el acero contiene menos de 0.03% de C, no se forman carburos de cromo.
2. Si el porcentaje de cromo es muy alto, es posible que la austenita no se agote a menos de 12% de Cr, incluso si se forman carburos de cromo.
3. La adición de titanio o niobio fija el carbono como TiC o NbC, impidiendo la formación de carburo de cromo. Se dice que el acero está **estabilizado**.
4. El intervalo de temperatura de sensibilización, de 425 a 870°C, debe evitarse durante la manufactura y el servicio.

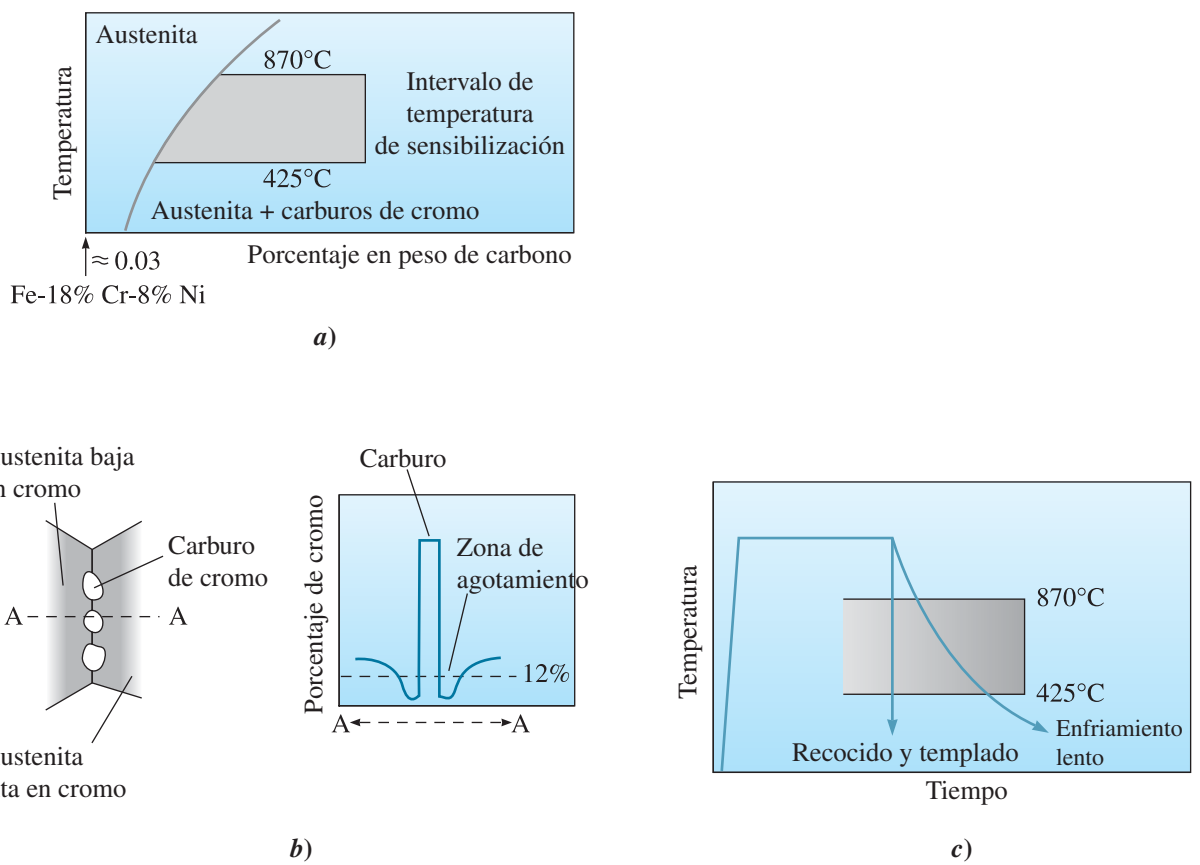


Figura 23-14 *a*) Los aceros inoxidables austeníticos se convierten en sensibilizados cuando se enfrían lentamente en el intervalo de temperatura entre 870 y 425°C. *b*) Un enfriamiento lento permite que se precipiten carburos de cromo en los límites de grano; se agota el contenido de cromo local. *c*) El recocido y templado para disolver los carburos puede impedir la corrosión entre granos.

5. En un tratamiento térmico de **recocido y templado**, el acero inoxidable se calienta arriba de 870°C, con lo que se disuelven los carburos de cromo. La estructura, que en esta forma contiene 100% de austenita, se templa rápidamente para impedir la formación de carburos.

Ejemplo 23-9 *Diseño de un sistema de protección contra la corrosión*

En un campo se instalan canales de acero para dar de beber a un rebaño de ganado. Es frecuente que los canales se oxiden y deban ser cambiados. Diseñe un sistema para evitar o retardar este problema.

SOLUCIÓN

Es probable que los canales sean de acero al bajo carbono y sin aleación, con ferrita y cementita, lo cual produce una celda de composición. La línea del agua en el canal, que está parcialmente lleno de agua, produce una celda de concentración. El canal también está expuesto al ambiente y el agua está contaminada con impurezas. En consecuencia, es de esperarse la corrosión del depósito de acero no protegido.

Para evitar o retardar la corrosión, podrían aplicarse varios métodos. Por ejemplo, se podría fabricar el canal usando acero inoxidable o aluminio. Cualquiera de éstos tendría mejor resistencia a la corrosión que el acero simple al carbono, pero ambos serían considerablemente más costosos que el material actual.

Se podría sugerir el uso de protección catódica, con un pequeño ánodo de magnesio conectado en el interior del canal. El ánodo se corroe por sacrificio y previene la corrosión del acero. Esto haría necesario que el operador de la granja revisara con regularidad el tanque para asegurarse de que el ánodo no se consuma por completo; también es deseable asegurarse de que los iones de magnesio introducidos en el agua no sean un riesgo para la salud.

Otro método sería proteger el canal de acero con un recubrimiento apropiado. Pintar el acero (es decir, introducir un recubrimiento de polímero protector) o usar un acero estañado daría protección siempre que el recubrimiento no se disuelva.

El método más adecuado es usar un acero galvanizado, aprovechando el recubrimiento protector y el comportamiento por sacrificio del zinc. La corrosión es muy lenta debido al tamaño grande del área del ánodo, incluso si el recubrimiento se disuelve. Además, el acero galvanizado es de un costo relativamente bajo, se puede obtener con facilidad y no requiere de frecuente inspección.

Ejemplo 23-10 *Diseño de una soldadura para acero inoxidable*

Un sistema de tuberías que se usa para el transporte de un líquido corrosivo está fabricado de acero inoxidable 304. Es necesario soldar los tubos para ensamblar el sistema. Desafortunadamente, se presenta corrosión y el líquido corrosivo se fuga de los tubos cerca de la soldadura. Identifique el problema y diseñe un sistema para evitar en el futuro la corrosión.

SOLUCIÓN

La tabla 13-4 muestra que el acero inoxidable 304 contiene 0.08% C, lo cual hace que el acero sea sensibilizado si no se calienta o se enfría de forma adecuada durante la operación de soldadura. La figura 23-15 muestra las temperaturas máximas alcanzadas en la fusión y las zonas afectadas por el calor durante la soldadura. Una parte de la tubería afectada por el calor se calienta a la temperatura de sensibilización, lo cual permite que se precipiten carburos de cromo. Si el enfriamiento de la soldadura es muy lento, la zona de fusión y otras partes de la zona afectada por el calor también pueden resultar afectadas. La sensibilización de la zona soldada, por lo tanto, es la probable causa de que el tubo se corroa.

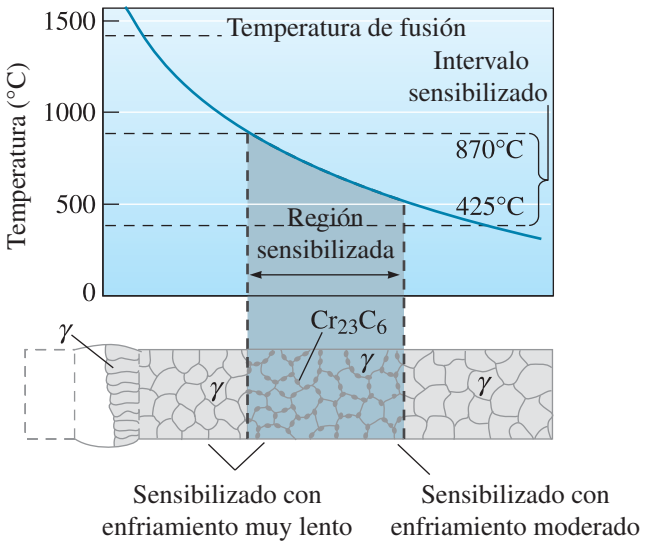


Figura 23-15 Temperatura máxima en la cercanía de una soldadura de acero inoxidable y estructura sensibilizada producida cuando la soldadura se enfría lentamente (para el ejemplo 23-10).

Se pueden considerar varias soluciones para este problema. Podría usarse un proceso de soldadura que permita una muy rápida entrada de calor, haciendo que la soldadura se caliente y se enfríe muy rápidamente. Si el acero se expone al intervalo de temperatura de sensibilización sólo durante un tiempo muy breve, es posible que no se precipiten carburos de cromo. Los procesos de unión como la soldadura con láser o con haz de electrones son de muy rápida entrada de calor, pero son costosos. Además, la soldadura por haz de electrones requiere el uso de un vacío y puede no ser factible para ensamblar el sistema de tuberías en una cámara de vacío.

Se podría dar tratamiento térmico al conjunto una vez hecha la soldadura. Al ejecutar un recocido y templado, cualquier carburo que se haya precipitado vuelve a disolverse durante el recocido y no se forma de nuevo durante el templado, pero puede no ser posible realizar este tratamiento en un conjunto de grandes dimensiones.

Puede revisarse el procedimiento original de soldadura para determinar si la tubería fue precalentada antes de la unión, para reducir al mínimo el desarrollo de esfuerzos debidos al proceso de soldadura. Si la tubería fue calentada previamente, es más probable que se presente la sensibilización. Se recomienda suspender cualquier procedimiento de precalentamiento.

Quizás el mejor diseño sea el uso de un acero inoxidable que no esté sujeto a la sensibilización. Por ejemplo, no se precipitan carburos en un acero inoxidable 304L, que contiene menos de 0.03% C. Los aceros inoxidables al bajo carbono son más costosos que el acero 304 normal; no obstante, el costo adicional evita la corrosión e incluso nos permite usar técnicas convencionales de unión.

23-7 Degradación microbiana y polímeros biodegradables

Una forma de "corrosión" de polímeros es el ataque de diversos insectos y microbios. Los polímeros relativamente simples (como el polietileno, polipropileno y poliestireno), los polímeros de alto peso molecular, los polímeros cristalinos y los termoestables son relativamente inmunes a ataques.

Algunos polímeros, como los poliésteres, poliuretanos, celulósicos y el cloruro de polivinilo plastificado (que contiene aditivos para reducir el grado de polimerización) son particularmente vulnerables a la degradación microbiana. Estos polímeros pueden descomponerse en moléculas de

bajo peso molecular por radiación o ataque químico hasta que sean suficientemente pequeñas para ser ingeridas por microbios.

Se aprovecha el ataque microbiano para la producción de polímeros *biodegradables*, ayudando así a eliminar material de la corriente de desperdicios. La biodegradación requiere la completa conversión del polímero en dióxido de carbono, agua, sales inorgánicas y otros pequeños productos derivados por la ingesta del material por bacterias. Los polímeros celulósicos pueden descomponerse con facilidad en moléculas con bajos pesos moleculares y, por lo tanto, son biodegradables. Además, se producen polímeros especiales que se degradan con rapidez; un copolímero de polietileno y almidón es un ejemplo. Las bacterias atacan la parte del almidón del polímero y reducen el peso molecular del polietileno restante. Otros polímeros, como el policaprolactano (PCL), el ácido poliláctico (PLA) y el ácido glicólico poliláctico (PLGA), son útiles en diversas aplicaciones biomédicas, como en suturas.

23-8 Oxidación y otras reacciones gaseosas

Materiales de todo tipo pueden reaccionar con oxígeno y otros gases. Estas reacciones pueden, al igual que la corrosión, alterar la composición, propiedades o integridad de un material. Como ya se mencionó, los metales como el Al y Ti reaccionan muy fácilmente con el oxígeno.

Oxidación de metales

Los metales pueden reaccionar con el oxígeno para producir un óxido en la superficie. Interesan tres aspectos de esta reacción: la facilidad con la que se oxida el metal, la naturaleza de la película de óxido que se forma y la rapidez con la que ocurre la **oxidación**.

La facilidad con la que ocurre la oxidación está dada por la energía libre estándar de formación para el óxido. La energía libre estándar de formación para un óxido puede determinarse a partir de un diagrama de Ellingham, como el que se muestra en la figura 23-16 y que además presenta que hay una fuerza grande de activación para la oxidación de magnesio y aluminio, en comparación con la oxidación de níquel o cobre. Esto se ilustra en el siguiente ejemplo.

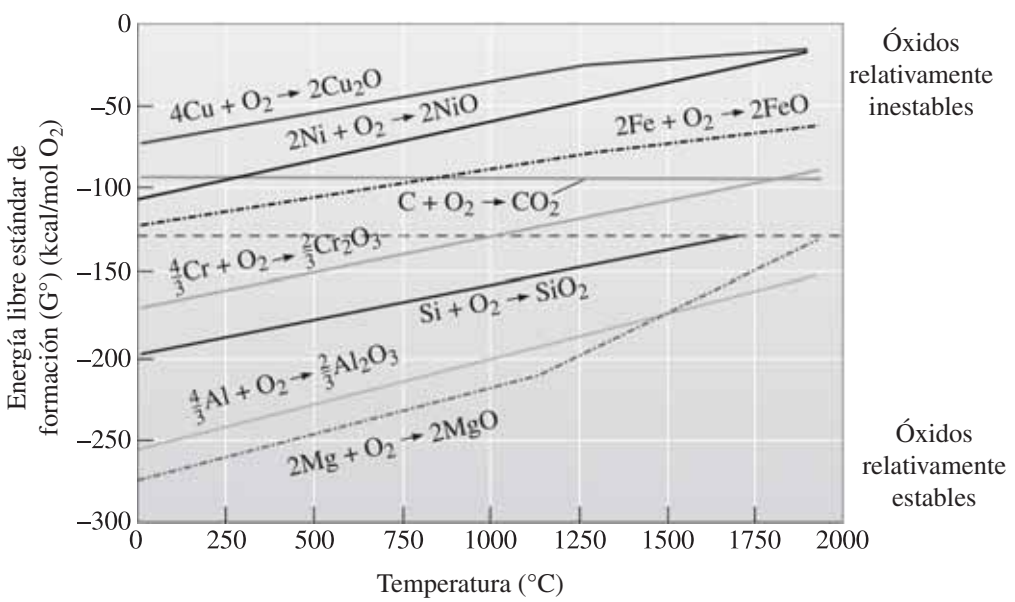


Figura 23-16 Energía libre estándar de formación de óxidos seleccionados como función de la temperatura. Una energía libre negativa grande indica un óxido más estable.

Ejemplo 23-11 *Aleaciones de acero a base de cromo*

Explique por qué no se deben agregar elementos de aleación como el cromo al arrabio, antes de que éste se convierta en acero en un horno básico de oxígeno a 1700°C.

SOLUCIÓN

En un horno básico de oxígeno, se baja el contenido de carbono del metal de alrededor de 4% a mucho menos de 1% si se sopla oxígeno a través del metal fundido. Si antes de iniciar la fabricación de acero ya se tuviera cromo, éste se oxidaría antes que el carbono (figura 23-16), puesto que el óxido de cromo tiene una menor energía libre de formación (o es más estable) que el dióxido de carbono (CO_2). Así, cualquier cantidad de cromo agregado de alto precio se perdería antes de remover el carbono del arrabio.

El tipo de película de óxido influye en la rapidez con la que ocurre la oxidación (figura 23-17). Para la **reacción de oxidación**

$$nM + mO_2 \rightarrow M_nO_{2m} \tag{23-12}$$

la **relación de Pilling-Bedworth** (P-B) es

$$\text{Relación P-B} = \frac{\text{volumen de óxido por átomo de metal}}{\text{volumen de metal por átomo de metal}} = \frac{(M_{\text{óxido}})(\rho_{\text{metal}})}{n(M_{\text{metal}})(\rho_{\text{óxido}})} \tag{23-13}$$

donde M es la masa atómica o molecular, ρ la densidad y n el número de átomos de metal en el óxido, como se define en la ecuación 23-12.

Si la relación de Pilling-Bedworth es menor de uno, el óxido ocupa un volumen menor que el metal del cual se forma; el recubrimiento, por lo tanto, es poroso, y la oxidación continúa rápidamente, lo cual es característico en metales como el magnesio. Si la relación es de uno a dos, los volú-

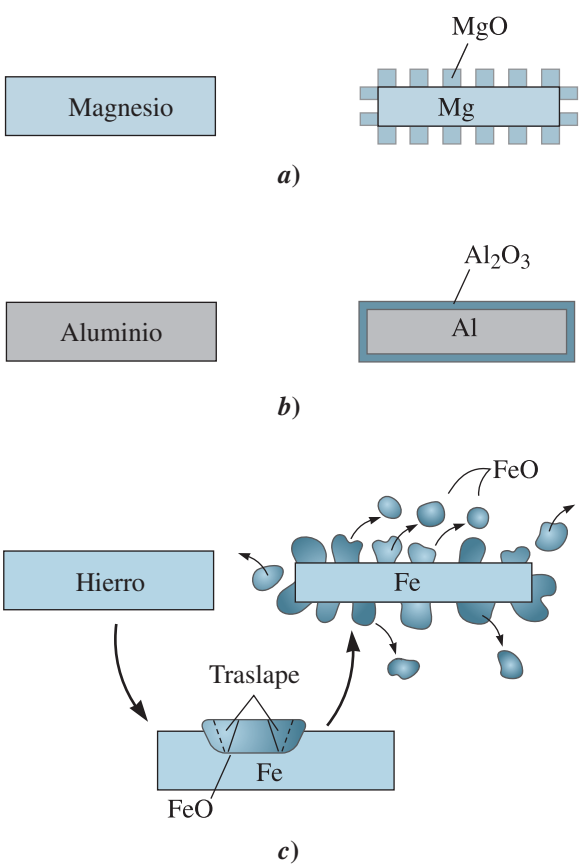


Figura 23-17 Con base en la relación de volúmenes entre metal y óxido, pueden formarse tres tipos de óxidos: *a*) el magnesio produce una película de óxido porosa, *b*) el aluminio forma una película de óxido protectora, adherente, no porosa y *c*) el hierro forma una película de óxido que se desprende de la superficie y proporciona una protección deficiente.

menes de óxido y metal son semejantes y se forma una película protectora, no porosa, característica del aluminio y el titanio. Si la relación es mayor de dos, el óxido ocupa un volumen más grande y puede desprenderse de la superficie, exponiendo metal fresco que continúa oxidándose, lo cual es característico del hierro. Aun cuando la ecuación de Pilling-Bedworth se ha empleado históricamente para caracterizar el comportamiento del óxido, se observan numerosas excepciones a este comportamiento. El uso de la relación P-B se ilustra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 23-12 *Relación de Pilling-Bedworth*

La densidad del aluminio es de 2.7 g/cm^3 y la del Al_2O_3 es de unos 4 g/cm^3. Describa las características de la película de óxido de aluminio. Compare con la película de óxido que se forma en el tungsteno. La densidad del tungsteno es de 19.254 g/cm^3 y la del WO_3 es de 7.3 g/cm^3.

SOLUCIÓN

Para $2Al + 3/2O_2 \rightarrow Al_2O_3$, el peso molecular del Al_2O_3 es de 101.96 gmol y la del aluminio es de 26.981 g/mol.

$$\text{P-B} = \frac{M_{Al_2O_3}\rho_{Al}}{nM_{Al}\rho_{Al_2O_3}} = \frac{\left(101.96\,\frac{g}{mol}\right)(2.7\,g/cm^3)}{(2)\left(26.981\,\frac{g}{mol}\right)(4\,g/cm^3)} = 1.28$$

Para el tungsteno, $W + 3/2O_2 \rightarrow WO_3$. El peso molecular del WO_3 es de 231.85 g/mol y el del tungsteno es de 183.85 g/mol.

$$\text{P-B} = \frac{M_{WO_3}\rho_{W}}{nM_{W}\rho_{WO_3}} = \frac{\left(231.85\,\frac{g}{mol}\right)(19.254\,g/cm^3)}{(1)\left(183.85\,\frac{g}{mol}\right)(7.3\,g/cm^3)} = 3.33$$

Como P-B $\simeq$ 1 para el aluminio, la película de Al_2O_3 es no porosa y adherente, que otorga protección al aluminio subyacente. Como P-B $>$ 2 para el tungsteno, el WO_3 debe ser no adherente y no protector.

La rapidez a la que ocurre la oxidación depende del acceso de oxígeno a los átomos de metal. Se presenta una rapidez lineal de oxidación cuando el óxido es poroso (como en el magnesio) y el oxígeno tiene un acceso continuo a la superficie metálica:

$$y = kt \tag{23-14}$$

donde y es el grosor del óxido, t el tiempo y k una constante que depende del metal y de la temperatura.

Cuando la difusión de iones o electrones a través de una capa de óxido no porosa es el factor de control, se observa una relación parabólica. Esta relación se observa en el hierro, cobre y níquel:

$$y = \sqrt{kt} \tag{23-15}$$

Por último, en el caso del crecimiento de películas delgadas de óxido que son particularmente protectoras, por ejemplo el aluminio y posiblemente el cromo, se observa una relación logarítmica:

$$y = k\ln(ct + 1) \tag{23-16}$$

donde k y c son constantes para una temperatura, ambiente y composición particulares. El ejemplo que sigue muestra el cálculo del tiempo necesario para que una lámina de níquel se oxide por completo.

Ejemplo 23-13 *Curva parabólica de oxidación para el níquel*

A 1000°C, el níquel puro sigue una curva parabólica de oxidación dada por la constante $k = 3.9 \times 10^{-12}$ cm^2/s en una atmósfera de oxígeno. Si esta relación no la afecta el grosor de la película de óxido, calcule el tiempo necesario para que una lámina de 0.1 cm de grueso se oxide por completo.

SOLUCIÓN

Si supone que la lámina se oxida en ambos lados:

$$y = \sqrt{kt} = \sqrt{\left(3.9 \times 10^{-12}\,\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right)(t)} = \frac{0.1\text{ cm}}{2\text{ lados}} = 0.05\text{ cm}$$

$$t = \frac{(0.05\,\text{cm})^2}{3.9 \times 10^{-12}\,\text{cm}^2/\text{s}} = 6.4 \times 10^8\,\text{s} = 20.3\,\text{años}$$

La temperatura también afecta la rapidez de oxidación. En muchos metales, esta rapidez es controlada por la intensidad de difusión de los iones oxígeno o metal a través del óxido. Si la difusión del oxígeno es más rápida, ocurre oxidación entre el óxido y el metal; si la difusión de iones metal es más rápida, ocurre oxidación en la interfase entre el óxido y la atmósfera. En consecuencia, se espera que la rapidez de oxidación siga una relación de Arrhenius, incrementándose de forma exponencial a medida que aumenta la temperatura.

Oxidación y degradación térmica de los polímeros

Los polímeros se degradan si se les calienta y/o se exponen al oxígeno. Una cadena polimérica puede romperse, produciendo dos macrorradicales. En termoestables rígidos, los macrorradicales pueden recombinarse instantáneamente (proceso conocido como efecto de *jaula*), con el resultado en que no hay cambio neto en el polímero. En los termoplásticos más flexibles, en particular para polímeros amorfos más que cristalinos, no ocurre recombinación, y el resultado es un descenso del peso molecular, viscosidad y propiedades mecánicas del polímero. La despolimerización continúa conforme el polímero es expuesto a temperaturas altas. Las cadenas poliméricas también se pueden *separar*, en cuyo caso los monómeros individuales se eliminan uno tras otro de los extremos de la cadena, reduciendo gradualmente el peso molecular de las cadenas restantes. A medida que disminuye el grado de polimerización, las cadenas restantes se hacen cada vez más ramificadas o puede ocurrir ciclización. En la *ciclización*, los dos extremos de la misma cadena pueden unirse para formar un anillo.

Los polímeros también se degradan por la pérdida de grupos laterales de la cadena. Los iones de cloro [en el cloruro de polivinilo (PVC)] y anillos de benceno (en el poliestireno) se pierden de la cadena, formando productos derivados. Por ejemplo, a medida que se degrada el cloruro de polivinilo, se produce ácido hidroclórico (HCl). Los átomos de hidrógeno están enlazados con más fuerza a las cadenas; así, el polietileno no se degrada con la misma facilidad que el PVC o el poliestireno. Los iones de fluoruro (en el Teflón^{MR}) son más difíciles de remover que los átomos de hidrógeno, lo que da al Teflón^{MR} su alta resistencia a la temperatura. Como ya se mencionó, la degradación de polímeros como PCL, PLGA y PLA, en realidad puede ser útil para ciertas aplicaciones biomédicas (por ejemplo, suturas que se disuelven) y también en el desarrollo de productos que no dañan el ambiente.

23-9 Desgaste y erosión

El desgaste y la erosión eliminan material de un componente por ataque mecánico de sólidos o líquidos. La corrosión y falla mecánica también contribuyen a este tipo de ataque.

Desgaste adhesivo

El **desgaste adhesivo**, también conocido como rayado, excoriación o agarrotamiento, se presenta cuando dos superficies sólidas se deslizan una sobre otra bajo presión. Las salientes de una superficie, o asperezas, se deforman plásticamente y al final quedan soldadas

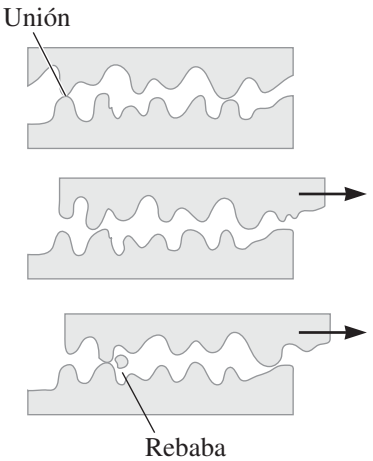


Figura 23-18 Las asperezas en dos superficies rugosas pueden unirse al principio, pero una fuerza suficientemente grande rompe la unión y las superficies se deslizan entre sí. Conforme ocurre esto último, las asperezas pueden fracturarse, desgastar las superficies y producir partículas o rebabas.

entre sí por las altas presiones locales (figura 23-18). A medida que continúe el deslizamiento, estos enlaces se rompen y producen cavidades en una superficie, salientes en la segunda superficie y frecuentemente diminutas partículas abrasivas, todas las cuales contribuyen a más desgaste de las superficies.

Deben considerarse numerosos factores cuando se trata de mejorar la resistencia al desgaste en materiales. Es posible evitar el desgaste por adhesiones que provocan la pérdida de material, si se diseñan componentes de modo que las cargas sean pequeñas, las superficies sean lisas y haya lubricación continua.

También son importantes las propiedades y la microestructura del material. Normalmente, si ambas superficies tienen alta dureza, la rapidez de desgaste es baja. Una alta resistencia, para ayudar a resistir cargas aplicadas, así como buena robustez y ductilidad, que evitan el desgarre de material de la superficie, son factores benéficos. Se espera que los materiales cerámicos, con su excepcional dureza, tengan buena resistencia al desgaste adhesivo.

La resistencia de polímeros al desgaste puede mejorarse si el coeficiente de fricción se reduce por la adición de politetrafluoretileno (Teflón^{MR}), o si el polímero es reforzado por la introducción de fibras de refuerzo como vidrio, carbono o aramidas.

Desgaste abrasivo

Cuando se elimina material de una superficie por contacto con partículas duras, se presenta el **desgaste abrasivo**. Puede haber partículas en la superficie de un segundo material o pueden existir como partículas sueltas entre las dos superficies (figura 23-19). Este tipo de desgaste es común en maquinaria como arados, cuchillas de niveladoras, trituradoras y molinos usados para manejar materiales abrasivos, y puede presentarse también cuando partículas duras se introducen de manera no intencional en partes móviles de maquinaria. El desgaste abrasivo también se usa para operaciones de maquinado con el fin de eliminar material de manera intencional. En innumerables aplicaciones automotrices (por ejemplo amortiguadores, engranajes, pistones y cilindros), el comportamiento del desgaste abrasivo es una preocupación importante.

Los materiales de alta dureza, buena tenacidad y alta resistencia al calor son los más resistentes al desgaste abrasivo. Entre los materiales comunes que se usan para aplicaciones de desgaste

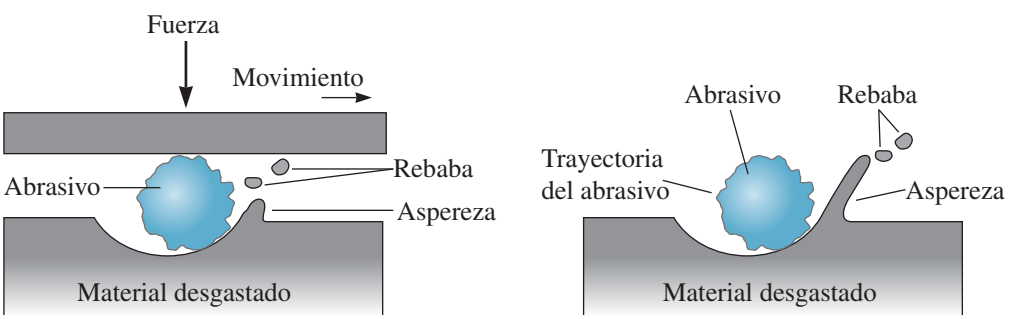


Figura 23-19 El desgaste abrasivo, causado ya sea por abrasivos atrapados o libres, produce depresiones en el material y acumula asperezas que pueden fracturarse en pequeñas rebabas.

abrasivo se cuentan los aceros templados y revenidos; aceros cementados o superficies endurecidas superficialmente; aleaciones de cobalto como Stallite; materiales compuestos, incluyendo materiales metal cerámicos (cermet) de carburo de tungsteno; piezas de hierro fundido blanco y superficies duras producidas por soldadura. La mayoría de los materiales cerámicos también resisten el desgaste de manera eficiente por su alta dureza, pero su fragilidad a veces limita su utilidad en condiciones de desgaste abrasivo.

Erosión líquida

La integridad de un material puede quedar destruida por la erosión provocada por altas presiones originadas por un líquido en movimiento. El líquido produce endurecimiento por deformación en la superficie metálica, lo cual lleva a deformación localizada, agrietamiento y pérdida de material. Dos tipos de erosión líquida merecen mencionarse.

La **cavitación** se presenta cuando un líquido que contiene un gas disuelto penetra en una región de baja presión. Las burbujas de gas, que se precipitan y crecen en el líquido en el entorno de baja presión, se colapsan cuando aumenta la subsiguiente presión. La alta presión, que es una onda de choque local que se produce por el colapso puede ejercer una presión de miles de atmósferas contra el material circundante. La cavitación se encuentra con frecuencia en hélices, presas y vertederos, así como en bombas hidráulicas.

La **colisión líquida** ocurre cuando gotitas líquidas llevadas en un gas de rápido movimiento inciden sobre una superficie metálica. Se forman altas presiones localizadas debido al impacto inicial y al rápido movimiento lateral de las gotitas desde el punto de impacto a lo largo de la superficie metálica. Las gotitas de agua llevadas por vapor pueden erosionar los álabes de turbinas de generadores de vapor y en plantas nucleares para generación de energía eléctrica.

La erosión líquida puede minimizarse por medio de una adecuada selección de materiales y diseño. Reducir al mínimo la velocidad del líquido, asegurar que el líquido no tenga aire, seleccionar materiales duros y tenaces para absorber el impacto de las gotitas, así como recubrir el material con un elastómero para absorción de energía, ayuda en su conjunto a reducir al mínimo la erosión.

Resumen

- Alrededor de 3% del producto interno bruto de Estados Unidos se utiliza para combatir la corrosión, misma que provoca el deterioro de todo tipo de materiales. Diseñadores e ingenieros deben saber cómo se produce para considerar diseños, seleccionar materiales o tomar medidas de protección adecuadas.
- En la corrosión química, un material se disuelve en un solvente, lo que resulta en pérdida del material. Todos los materiales, ya sea metales, cerámicos, polímeros y compuestos, están sujetos a esta forma de ataque. La selección de materiales adecuados que tengan una baja solubilidad en un disolvente determinado, o el uso de recubrimientos inertes en materiales, ayuda a evitar o reducir la corrosión química.
- La corrosión electroquímica requiere formar un circuito eléctrico completo. El ánodo se corroe y en el cátodo se forma un subproducto como la herrumbre. Debido a que se requiere de un circuito eléctrico, esta forma de corrosión es más seria en metales y aleaciones.
- Se forman celdas de composición por la presencia de dos metales diferentes, dos fases distintas dentro de una sola aleación o incluso segregación dentro de una sola fase.
- Las celdas de esfuerzo se forman cuando el nivel de esfuerzos residuales o aplicados varía dentro del metal; las regiones sujetas al esfuerzo más alto son anódicas y, en consecuencia, se corroen. El agrietamiento por corrosión por esfuerzo y fatiga por corrosión son ejemplos de celdas de esfuerzo.
- Se forman celdas de concentración cuando un metal queda expuesto a un electrolito no uniforme; por ejemplo, se corroe la parte de un metal expuesto al contenido más bajo de oxígeno. La corrosión por fosas, corrosión en la línea de agua o de flotación y la corrosión por hendiduras son ejemplos de estas celdas. La corrosión microbiana, en la que colonias de organismos como bacterias crecen en la superficie, es otro ejemplo de una celda de concentración.

- La corrosión electroquímica se puede evitar o reducir al mínimo con el uso de aislantes eléctricos para abrir el circuito eléctrico, diseñando y fabricando conjuntos sin hendiduras, diseñando conjuntos de modo que el área del ánodo sea grande en comparación con la del cátodo, usando recubrimientos de protección y hasta de sacrificio, inhibiendo la acción del electrolito, suministrando electrones al metal por medio de un voltaje aplicado, usando tratamientos térmicos que reducen los esfuerzos residuales o la segregación, y numerosas acciones adicionales.
- La oxidación degrada casi todos los materiales. Si bien un recubrimiento de óxido proporciona protección para algunos metales, como el aluminio, casi todos los materiales son atacados por el oxígeno. Muchas veces es importante la difusión de oxígeno y de átomos metálicos; por lo tanto, la oxidación ocurre con más rapidez a temperaturas altas.
- Otros factores, por ejemplo el ataque de microbios, daños causados por radiación, así como desgaste o erosión de un material, también pueden provocar que un material se deteriore.

Glosario

Anodizado Técnica de protección anódica en la que se produce deliberadamente una gruesa capa de óxido sobre una superficie metálica.

Ánodo Lugar donde ocurre la corrosión al ceder electrones e iones en una celda electroquímica.

Ánodo de sacrificio Protección catódica mediante la cual al material que se ha de proteger se le conecta eléctricamente un material más anódico. El ánodo se corroe para proteger el material deseado.

Cátodo Lugar donde los electrones son aceptados y se genera un subproducto durante la corrosión electroquímica.

Cavitación Erosión en la superficie de un material debido a presiones provocadas al colapsarse una burbuja de gas dentro de un líquido en movimiento.

Celda electroquímica Celda en la que electrones y iones pueden moverse por trayectorias diferentes entre dos metales, produciendo una corriente que, a su vez, origina la corrosión o chapado.

Celdas de composición Celdas de corrosión electroquímica entre dos materiales de diferente composición. También se conocen como celdas galvánicas.

Celdas de concentración Celdas de corrosión electroquímica producidas entre dos lugares de un material en los que la composición del electrolito es diferente.

Celdas de esfuerzo Celdas de corrosión electroquímica producida por diferencias en esfuerzos residuales o aplicados en distintos lugares dentro del material.

Colisión líquida Erosión de un material provocada por el impacto de gotitas de líquido llevadas por una corriente de gas.

Corrosión electroquímica Corrosión producida por la generación de una corriente en una celda electroquímica y que remueve iones del metal.

Corrosión grafítica Proceso especial de corrosión química mediante el que se lixivia el hierro de la fundición de hierro, dejando tras de sí una masa de grafito esponjosa y débil.

Corrosión intergranular Corrosión en los límites de grano debida a que la segregación o la precipitación de los mismos produce celdas galvánicas.

Corrosión por esfuerzo Deterioro de un material en el que un esfuerzo aplicado acelera la rapidez de corrosión.

Corrosión por hendiduras Celda de concentración especial en la que se presenta corrosión debido a la baja concentración de oxígeno.

Corrosión química Remoción de átomos de un material por medio de solubilidad o reacción química entre el material y el líquido circundante.

Desgaste abrasivo Remoción de material en superficies debido a la acción cortante de partículas.

Desgaste adhesivo Remoción de material en superficies debido a una unión local momentánea, seguida por la fractura de la unión en la superficie.

Deszincificado Proceso especial de corrosión química por medio del cual los átomos de zinc y de cobre se separan del latón, pero el cobre vuelve a depositarse sobre el metal.

Ecuación de Faraday Relación que describe la rapidez con la que ocurre una corrosión o galvanización en una celda electroquímica.

Ecuación de Nernst Relación que describe el efecto de la concentración de electrolito sobre el potencial del electrodo en una celda electroquímica.

Electrolito Medio conductor a través del cual se mueven iones para transportar corriente en una celda electroquímica.

Escasez de oxígeno En la celda de concentración, las regiones del electrolito con bajo oxígeno provocan que el material base se comporte como ánodo y sufra corrosión.

Estabilización Adición de titanio o de niobio a un acero inoxidable para evitar la corrosión intergranular.

Inhibidores Aditivos para el electrolito que emigran de preferencia, ya sea hacia el ánodo o al cátodo, provocando polarización y reduciendo la rapidez de corrosión.

Oxidación Reacción de un metal con el oxígeno para producir un óxido metálico. Ocurre normalmente con más rapidez a temperaturas altas.

Pasivación Producción de un recubrimiento protector sobre la superficie del ánodo, que interrumpe el circuito eléctrico.

Polarización Modificación del voltaje entre el ánodo y el cátodo con el objeto de reducir la rapidez de corrosión. La polarización de *activación* se relaciona con la energía necesaria para provocar la reacción anódica o catódica; la polarización de *concentración* se relaciona con los cambios en la composición del electrolito; la polarización de resistencia se relaciona con la resistividad eléctrica del electrolito.

Potencial de electrodo Es el voltaje generado entre el material y un electrodo estándar. Se relaciona con la tendencia de un material a corroerse.

Reacción de oxidación Reacción anódica mediante la cual se ceden electrones a la celda electroquímica.

Reacción de reducción Reacción catódica mediante la cual se aceptan los electrones provenientes de la celda electroquímica.

Recocido y templado Tratamiento térmico utilizado para disolver los carburos y evitar la corrosión intergranular en aceros inoxidables.

Relación Pilling-Bedworth Razón del volumen de óxido por átomo metálico con relación al volumen metálico por átomo de metal en una superficie metálica oxidada. Este valor predice la morfología de la película de óxido que se forma en una superficie metálica durante la oxidación.

Sensibilización Precipitación de carburos de cromo en los límites de grano de aceros inoxidables, para que el acero sea sensible a la corrosión intergranular.

Serie de fuerza electromotriz [FEM] Grupo de elementos con base en su potencial de electrodo o, lo que es lo mismo, a su tendencia a corroerse.

Serie galvánica Grupo de aleaciones con base en su tendencia a corroerse en un ambiente en particular.

Tubérculo Acumulaciones de organismos microbianos y subproductos de la corrosión sobre la superficie de un material.

Voltaje aplicado Técnica de protección catódica mediante la cual se introduce una corriente directa en el metal que se ha de proteger, evitando así la reacción anódica.

Problemas

Sección 23-1 Corrosión química

Sección 23-2 Corrosión electroquímica

Sección 23-3 Potencial del electrodo en celdas electroquímicas

Sección 23-4 La corriente de corrosión y la polarización

Sección 23-5 Tipos de corrosión electroquímica

23-1 Explique cómo es posible formar una celda electroquímica simple usando un limón, una moneda de a centavo y un clavo de acero galvanizado.

23-2 La plata se puede pulir si se coloca en una charola de aluminio que contenga una solución de bicarbonato de sodio, sal y agua. Especule sobre cómo funciona el proceso de pulido.

23-3 Una tubería de hierro fundido gris se usa en el sistema de distribución de gas natural de una ciudad. La tubería falla y se presenta una fuga, aun cuando la inspección visual no muestra corrosión visible alguna. Explique la falla de esta tubería.

23-4 Una conexión de latón para plomería fabricado con una aleación de Cu-30% Zn opera en el sistema de agua caliente de un gran edificio de oficinas. Después de cierto tiempo de uso, se

presentan grietas y fugas en la conexión. Con base en el examen visual, el metal no parece haberse corroído. Explique la falla de la conexión.

23-5 Trace la gráfica de la electronegatividad de los elementos citados en la tabla 23-1 como función del potencial de electrodo. (Consulte en el capítulo 2 los valores de electronegatividad.) ¿Cuál es la tendencia que se observa en esta información? Usando un ejemplo, explique la forma en que la estructura electrónica de un metal es consistente con su tendencia anódica o catódica.

23-6 Escriba la reacción anódica o catódica según corresponda para el aluminio, el germanio y el cromo.

23-7 Suponga que 10 gramos de Sn^{2+} se disuelven en 1000 ml de agua para producir un electrolito. Calcule el potencial de electrodo de la semicelda de estaño.

23-8 Utilice la ecuación de Nernst para determinar la concentración de cromo en agua si la diferencia del potencial estándar es de +0.016 volts.

23-9 Una semicelda producida al disolver cobre en agua produce un potencial de electrodo de +0.32 V. Calcule la cantidad de cobre que debe haberse añadido a 1000 ml de agua para producir este potencial.

23-10 En una semicelda de platino, un potencial de electrodo es de 1.10 V. Determine las concentraciones de iones Pt^{4+} en el electrolito.

23-11 Utilice la ecuación de Faraday para determinar el tiempo en que una corriente de 5 A corroería completamente un bloque de 50 g de plata.

23-12 A un cátodo de 150 cm^2 se le aplica una densidad de corriente de 0.05 A/cm^2. ¿Cuál es el tiempo necesario para depositar una película de plata de 1 mm de espesor en el cátodo?

23-13 Por electrochapado, se desea producir 100 g de platino por hora sobre un cátodo de 1000 cm^2. ¿Cuál es la densidad de corriente del chapado requerida? Determine la corriente necesaria.

23-14 Una placa de 1 m^2 de acero se recubre por ambas caras con una capa de zinc de 0.005 cm de espesor. Se le aplica una densidad de corriente de 0.02 A/cm^2 en una solución acuosa. Suponiendo que el zinc se corroe de manera uniforme, determine el tiempo necesario antes de exponer el acero.

23-15 Una tubería de distribución de cobre, de 5 cm de diámetro interior y 360 cm de longitud, se conecta de forma accidental al sistema de alimentación de energía de una planta manufacturera, haciendo que circulen 0.05 A por esa tubería. Si la pared de la tubería es de 0.313 cm, estime el tiempo necesario antes de que la tubería presente fuga suponiendo una rapidez uniforme de corrosión.

23-16 Una superficie de acero de 10 cm × 100 cm está recubierta con una capa de cromo de 0.002 cm de grueso. Después de un año de exposición a una celda electrolítica, la capa de cromo ha desaparecido por completo. Calcule la densidad de corriente necesaria para llevar a cabo esta eliminación.

23-17 Una celda de corrosión está formada por una hoja de cobre de 300 cm^2 y una lámina de hierro de 20 cm^2, con una densidad de corriente de 0.6 A/cm^2 aplicada al cobre. ¿Cuál de los dos materiales es el ánodo? ¿Cuál es la rapidez de pérdida de metal del ánodo por hora?

23-18 Una celda de corrosión está formada por una hoja de cobre de 20 cm^2 y una lámina de hierro de 400 cm^2, con una densidad de corriente de 0.7 A/cm^2 aplicada al cobre. ¿Cuál de los dos materiales es el ánodo? ¿Cuál es la rapidez de pérdida de metal del ánodo por hora?

23-19 De la tabla 23-2 liste sólo los elementos puros de la serie galvánica en agua de mar ordenados de catódico a anódico.

23-20 Enuncie por lo menos dos razones de por qué el acero solo en agua, sin ningún otro metal presente, se corroe.

23-21 Escriba las reacciones anódicas y catódicas de una semicelda provocadas por la precipitación del carburo de cromo a partir de aceros inoxidables austeníticos.

Sección 23-6 Protección contra corrosión electroquímica

Sección 23-7 Degradación microbiana y polímeros biodegradables

23-22 Explique por qué el titanio es un material que con frecuencia se usa en implantes médicos, aun cuando es uno de los materiales más anódicos citados en la tabla 23-1.

23-23 El Alclad es un compuesto laminar formado de dos hojas de aluminio comercialmente puro (aleación 1100) emparedadas en un núcleo de aleación de aluminio 2024. Analice la resistencia a la corrosión de este material compuesto. Suponga que una parte de una de las hojas de aluminio 1100 se eliminara mecánicamente, exponiendo una pequeña parte de la aleación 2024. ¿De qué manera afectaría esto la resistencia a la corrosión? Explique. ¿Existiría alguna diferencia en el comportamiento si el núcleo estuviera fabricado de aluminio 3003? Explique.

23-24 Los resortes de hojas de un automóvil están hechos de acero al alto carbono. Para mejor resistencia a la corrosión, ¿los muelles deben fabricarse en caliente o en frío? Explique. ¿Seguiría

presente la corrosión incluso si se utiliza el proceso de fabricación deseable? Explique.

23-25 Se utilizan varios tipos de recubrimientos metálicos para la protección del acero, incluyendo zinc, plomo, estaño, cadmio, aluminio y níquel. ¿En cuáles de estos casos el recubrimiento proporcionará protección, a pesar de que el recubrimiento haya sido destruido localmente? Explique.

23-26 Un acero inoxidable austenítico se corroe en toda la zona afectada por el calor (ZAC) que rodea la zona de fusión de una soldadura. Explique la razón por la cual se presenta corrosión y analice el tipo de proceso o procedimiento de soldadura que probablemente se haya utilizado. ¿Qué sería conveniente hacer para impedir la corrosión de esa parte?

23-27 En un ambiente industrial, una tuerca de acero está firmemente apretada a un perno. Después de varios meses, se encuentra que la tuerca tiene numerosas grietas, aun cuando sobre ella no actúa alguna carga externa aplicada. Explique por qué pudiera haber ocurrido la falla.

23-28 La flecha de la hélice de un barco está cuidadosamente diseñada para que los esfuerzos aplicados queden muy por debajo del límite de resistencia a la fatiga del material. A pesar de lo anterior, después de varios meses, la hélice se agrieta y falla. Explique por qué pudiera haber ocurrido la falla en estas condiciones.

23-29 El ala de un avión está compuesta de epoxi reforzado con fibras de carbono y está conectada a una pieza del fuselaje forjada de titanio. ¿Cuál será el ánodo para una celda de corrosión: la fibra de carbono, el titanio o el epóxico? ¿Cuál de ellos es más probable que actúe como cátodo? Explique.

23-30 La superficie interior de una tubería de hierro fundido está recubierta de brea, que proporciona un recubrimiento protector. De manera periódica, a través de esta tubería se drena la acetona de un laboratorio químico. Explique por qué, después de varias semanas, la tubería comienza a corroerse.

23-31 Un tubo de cobre trabajado en frío se suelda a un conector de acero, usando una aleación de plomo-estaño. ¿Qué tipos de celdas electroquímicas pueden formarse debido a esta conexión? ¿Qué materiales se esperaría que sirvan de ánodo y sufran el mayor daño debido a la corrosión? Explique.

23-32 En muchas aplicaciones eléctricas se usa estaño puro para efectuar conexiones de soldadura con el cobre. ¿Qué metal será más probablemente el que actúe como ánodo?

23-33 En un electrolito se colocan láminas de níquel recocido, níquel trabajado en frío y níquel recristalizado. ¿Cuál es el que más probablemente se va a corroer? ¿Cuál es el menos probable? Explique.

23-34 Una tubería que transporta fertilizante líquido cruza un pequeño arroyo. La corriente de agua lleva un árbol de tamaño grande y se atasca contra la tubería de acero. Después de algún tiempo, se produce un agujero en la tubería en el punto donde el árbol toca la tubería, con el diámetro del agujero más grande en el exterior que en el interior de la tubería. Ésta comienza a dejar escapar fertilizante en el arroyo. Explique por qué el tubo se ha corroído.

23-35 Dos láminas de acero 1040 se unen usando un remache de aluminio (figura 23-20). Analice las posibles celdas de corrosión que se pueden crear como resultado de este proceso de unión. Recomiende un proceso de unión que podría reducir al mínimo algunas de estas celdas.

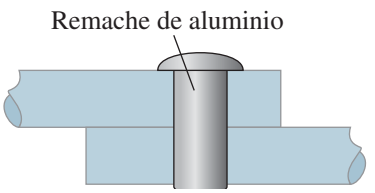


Figura 23-20 Dos hojas de acero unidas con un remache de aluminio (para el problema 23-35).

23-36 La figura 23-21 muestra la sección transversal de un circuito integrado encapsulado en epoxi, incluyendo un muy pequeño espacio entre la estructura del terminal de cobre y el polímero de epoxi. Suponga que iones de cloro del proceso de manufactura penetran en el encapsulado. ¿Qué tipos de celdas de corrosión pueden formarse? ¿Cuáles son las partes del circuito integrado con mayores probabilidades de corroerse?

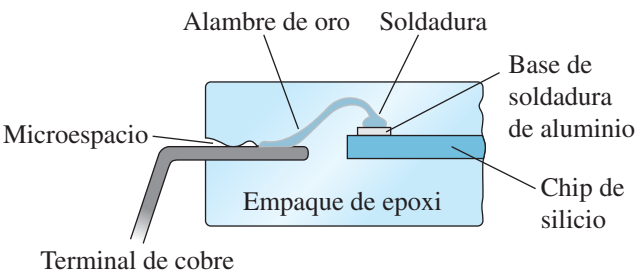


Figura 23-21 Sección transversal de un circuito integrado que muestra la terminal externa conectada al chip o microprocesador (para el problema 23-36).

23-37 Al hierro de una celda de corrosión de hierro-zinc se le aplica una densidad de corriente de

0.1 A/cm^2. Calcule la pérdida en peso de zinc por hora

a) si el zinc tiene un área de 10 cm^2, y el hierro un área de 100 cm^2 y

b) si el zinc tiene una superficie de 100 cm^2 y el hierro una superficie de 10 cm^2.

Sección 23-8 Oxidación y otras reacciones gaseosas

Sección 23-9 Desgaste y erosión

23-38 Determine la relación Pilling-Bedworth para los siguientes metales y anticipe el comportamiento del óxido que se forma sobre sus superficies. ¿Es protector el óxido, se desprende del metal o es permeable? (Vea en el apéndice A la densidad de los metales.)

	Densidad del óxido (g/cm^3)	
Mg-MgO	3.60	
Na-Na_2O	2.27	
Ti-TiO_2		5.10
Fe-Fe_2O_3	5.30	
Ce-Ce_2O_3	6.86	
Nb-Nb_2O_5	4.47	
W-WO_3	7.30	

23-39 La oxidación de la mayor parte de los productos cerámicos no se considera que sea un problema. Explique.

23-40 Una lámina de cobre se expone al oxígeno a 1000°C. Después de 100 horas, 0.246 g de cobre se pierden por cm^2 del área superficial; luego de 250 horas, 0.388 g/cm^2 se pierden; y después de 500 h, 0.550 g/cm^2 se pierden. Determine si la oxidación es parabólica, lineal o logarítmica y, a continuación, determine el tiempo necesario para oxidar por completo una lámina de cobre de 0.75 cm. La lámina de cobre se oxida por ambos lados.

23-41 A 800°C el hierro se oxida con una rapidez de 0.014 g/cm^2 por hora; a 1000°C se oxida con una rapidez de 0.0656 g/cm^2 por hora. Suponiendo una rapidez parabólica de oxidación, determine la temperatura máxima a la que se puede mantener el hierro si la rapidez de oxidación es menor de 0.005 g/cm^2 por hora.

Problemas de diseño

23-42 Un depósito cilíndrico de acero de 90 cm de diámetro y 240 cm de largo está lleno de agua. Se encuentra que se requiere una densidad de corriente de 0.015 A/cm^2 que actúe sobre el acero para impedir la corrosión. Diseñe un sistema de ánodo de sacrificio que proteja el depósito.

23-43 Las plataformas marinas de perforación están soportadas por grandes columnas de acero que se apoyan en el fondo del mar. Diseñe un procedimiento para asegurar que no ocurrirá corrosión en las columnas de soporte de acero.

23-44 Debe construirse una bodega de almacenamiento usando láminas de acero para las paredes y el techo. Diseñe un sistema de protección contra la corrosión para el acero.

23-45 Diseñe los materiales para la cuchilla de nivelación de una máquina para movimiento de tierras.

Problemas por computadora

23-46 Edite un programa de cómputo que calcule el grosor de un recubrimiento depositado utilizando diferentes entradas proporcionadas por el usuario (por ejemplo, densidad y valencia del metal, área o dimensiones de la pieza en proceso de chapado, tiempo deseado de chapado y corriente).

Problemas Knovel^{MR}

K23-1 Describa el mecanismo de corrosión por corriente parásita.

K23-2 Describa la forma en que cambia la rapidez de corrosión del cobre con una rapidez creciente de solución a diferentes temperaturas. Explique el mecanismo para este cambio.

K23-3 Cinco gramos de zirconio se disuelven en 1000 g de agua, produciendo un electrolito de iones de Zr^{4+}. Calcule el potencial de electrodo de la semicelda de cobre en este electrolito, a temperatura y presión estándar, usando la ecuación de Nernst.

APÉNDICE A:

Propiedades físicas de algunos metales

Metal		Número atómico	Estructura cristalina	Parámetros de red (Å)	Masa atómica g/mol	Densidad (g/cm^3)	Temperatura de fusión (°C)
Aluminio	Al	13	CCCa	4.04958	26.981	2.699	660.4
Antimonio	Sb	51	hex	$a=4.307$ $c=11.273$	121.75	6.697	630.7
Arsénico	As	33	hex	$a=3.760$ $c=10.548$	74.9216	5.778	816
Bario	Ba	56	CCCu	5.025	137.3	3.5	729
Berilio	Be	4	CH	$a=2.2858$ $c=3.5842$	9.01	1.848	1290
Bismuto	Bi	83	mono	$a=6.674$ $b=6.117$ $c=3.304$ $\beta=110.3°$	208.98	9.808	271.4
Boro	B	5	rombo	$a=10.12$ $\beta=65.5°$	10.81	2.36	2076
Cadmio	Cd	48	CH	$a=2.9793$ $c=5.6181$	112.4	8.642	321.1
Calcio	Ca	20	CCCa	5.588	40.08	1.55	839
Cerio	Ce	58	CH	$a=3.681$ $c=5.99$	140.12	6.6893	798
Cesio	Cs	55	CCCu	6.13	132.91	1.892	28.6
Cobalto	Co	27	CH	$a=2.5071$ $c=4.0686$	58.93	8.832	1495
Cobre	Cu	29	CCCa	3.6151	63.54	8.93	1084.9
Cromo	Cr	24	CCCu	2.8844	51.996	7.19	1907
Estaño	Sn	50	tetra CD	$a=5.832$ $c=3.182$ 6.4912	118.69	5.765	231.9
Estroncio	Sr	38	CCCa CCCu	6.0849 4.84	87.62	2.6	777 (>557 °C)
Gadolinio	Gd	64	CH	$a=3.6336$ $c=5.7810$	157.25	7.901	1313
Galio	Ga	31	orto	$a=4.5258$ $b=4.5186$ $c=7.6570$	69.72	5.904	29.8
Germanio	Ge	32	CD	5.6575	72.59	5.324	937.4

(*Continúa*)

Metal		Número atómico	Estructura cristalina	Parámetros de red (Å)	Masa atómica g/mol	Densidad (g/cm^3)	Temperatura de fusión (°C)
Hafnio	Hf	72	CH	$a=3.1883$ $c=5.0422$	178.49	13.31	2 227
Hierro	Fe	26	CCCu CCCa CCCu	2.866 3.589	55.847 (>912 °C) (>1394 °C)	7.87	1 538
Indio	In	49	tetra	$a=3.2517$ $c=4.9459$	114.82	7.286	156.6
Iridio	Ir	77	CCCa	3.84	192.9	22.65	2 447
Itrio	Y	39	CH	$a=3.648$ $c=5.732$	88.91	4.469	1 522
Lantano	La	57	CH	$a=3.774$ $c=12.17$	138.91	6.146	918
Litio	Li	3	CCCu	3.5089	6.94	0.534	180.7
Magnesio	Mg	12	CH	$a=3.2087$ $c=5.209$	24.312	1.738	650
Manganeso	Mn	25	cúbica	8.931	54.938	7.47	1 244
Mercurio	Hg	80	rombo		200.59	13.546	−38.9
Molibdeno	Mo	42	CCCu	3.1468	95.94	10.22	2 623
Níquel	Ni	28	CCCa	3.5167	58.71	8.902	1 453
Niobio	Nb	41	CCCu	3.294	92.91	8.57	2 468
Oro	Au	79	CCCa	4.0786	196.97	19.302	1 064.4
Osmio	Os	76	CH	$a=2.7341$ $c=4.3197$	190.2	22.57	3 033
Paladio	Pd	46	CCCa	3.8902	106.4	12.02	1 552
Plata	Ag	47	CCCa	4.0862	107.868	10.49	961.9
Platino	Pt	78	CCCa	3.9231	195.09	21.45	1 769
Plomo	Pb	82	CCCa	4.9489	207.19	11.36	327.4
Potasio	K	19	CCCu	5.344	39.09	0.855	63.2
Renio	Re	75	CH	$a=2.760$ $c=4.458$	186.21	21.04	3 186
Rodio	Rh	45	CCCa	3.796	102.99	12.41	1 963
Rubidio	Rb	37	CCCu	5.7	85.467	1.532	38.9
Rutenio	Ru	44	CH	$a=2.6987$ $c=4.2728$	101.07	12.37	2 334
Selenio	Se	34	mono	$a=9.054$ $b=9.083$ $c=11.60$ $\beta=90.8°$	78.96	4.809	217
Silicio	Si	14	CD	5.4307	28.08	2.33	1 410
Sodio	Na	11	CCCu	4.2906	22.99	0.967	97.8
Tantalio	Ta	73	CCCu	3.3026	180.95	16.6	2 996
Tecnecio	Tc	43	CH	$a=2.735$ $c=4.388$	98.9062	11.5	2 157
Telurio	Te	52	hex	$a=4.4565$ $c=5.9268$	127.6	6.24	449.5
Titanio	Ti	22	CH	$a=2.9503$ $c=4.6831$	47.9	4.507	1 668
			CCCu	3.32			(>882 °C)

(*continúa*)

(*Continúa*)

Metal		Número atómico	Estructura cristalina	Parámetros de red (Å)	Masa atómica g/mol	Densidad (g/cm^3)	Temperatura de fusión (°C)
Torio	Th	90	CCCa	5.086	232	11.72	1 775
Tungsteno	W	74	CCCu	3.1652	183.85	19.254	3 422
Uranio	U	92	orto	$a = 2.854$ $b = 5.869$ $c = 4.955$	238.03	19.05	1 133
Vanadio	V	23	CCCu	3.0278	50.941	6.1	1 910
Zinc	Zn	30	CH	$a = 2.6648$ $c = 4.9470$	65.38	7.133	420
Zirconio	Zr	40	CH	$a = 3.2312$ $c = 5.1477$	91.22	6.505	1 852
			CCCu	3.6090			(>862 °C)

APÉNDICE B

Radios atómicos e iónicos de algunos elementos

Elemento	Radio atómico (Å)	Valencia	Radio iónico (Å)
Aluminio	1.432	+3	0.51
Antimonio	1.45	+5	0.62
Arsénico	1.15	+5	2.22
Azufre	1.06	- 2	1.84
Bario	2.176	+2	1.34
Berilio	1.143	+2	0.35
Bismuto	1.60	+5	0.74
Boro	0.46	+3	0.23
Bromo	1.19	- 1	1.96
Cadmio	1.49	+2	0.97
Calcio	1.976	+2	0.99
Carbono	0.77	+4	0.16
Cerio	1.84	+3	1.034
Cesio	2.65	+1	1.67
Cloro	0.905	- 1	1.81
Cobalto	1.253	+2	0.72
Cobre	1.278	+1	0.96
Cromo	1.249	+3	0.63
Estaño	1.405	+4	0.71
Estroncio	2.151	+2	1.12
Fósforo	1.10	+5	0.35
Flúor	0.6	- 1	1.33
Galio	1.218	+3	0.62
Germanio	1.225	+4	0.53
Hafnio	1.55	+4	0.78
Hidrógeno	0.46	+1	1.54
Hierro	1.241 (CCCu)	+2	0.74
	1.269 (CCCa)	+3	0.64
Indio	1.570	+3	0.81
Itrio	1.824	+3	0.89
Lantano	1.887	+3	1.15
Litio	1.519	+1	0.68
Magnesio	1.604	+2	0.66
Manganeso	1.12	+2	0.80
		+3	0.66
Mercurio	1.55	+2	1.10
Molibdeno	1.363	+4	0.70

(*Continúa*)

Elemento	Radio atómico (Å)	Valencia	Radio iónico (Å)
Niobio	1.426	+4	0.74
Níquel	1.243	+2	0.69
Nitrógeno	0.71	+5	0.15
Oro	1.442	+1	1.37
Oxígeno	0.60	- 2	1.32
Paladio	1.375	+4	0.65
Plata	1.445	+1	1.26
Platino	1.387	+2	0.80
Plomo	1.75	+4	0.84
Potasio	2.314	+1	1.33
Rubidio	2.468	+1	1.48
Selenio	1.15	- 2	1.91
Silicio	1.176	+4	0.42
Sodio	1.858	+1	0.97
Tántalo	1.43	+5	0.68
Telurio	1.40	- 2	2.11
Titanio	1.475	+4	0.68
Torio	1.798	+4	1.02
Tungsteno	1.371	+4	0.70
Uranio	1.38	+4	0.97
Vanadio	1.311	+3	0.74
Yodo	1.35	- 1	2.20
Zinc	1.332	+2	0.74
Zirconio	1.616	+4	0.79

Nótese que 1 Å = 10^{-8} *cm = 0.1 nanómetro (nm).*

RESPUESTAS DE PROBLEMAS SELECCIONADOS

CAPÍTULO 2

2-6 *a*) 6.7×10^{21} átomos. *b*) *i*) 3.30×10^{22} átomos/cm^3. *ii*) 4.63×10^{22} átomos/cm^3.

2-7 *a*) 9.78×10^{27} átomos/ton. *b*) 4.6 cm^3.

2-8 *a*) 5.99×10^{23} átomos. *b*) 0.994 mol.

2-41 MgO, MgO tiene enlaces iónicos.

2-43 Sí, Si tiene enlaces covalentes.

CAPÍTULO 3

3-14 *a*) 1.426×10^{-8} cm. *b*) 1.4447×10^{-8} cm.

3-17 *a*) 5.3349 Å. *b*) 2.3101 Å.

3-19 CCCa.

3-21 Tetragonal centrada en el cuerpo.

3-23 *a*) 8 átomos por celda. *b*) 0.387.

3-29 *a*) 4 Th, 8 O. *b*) Sí, 4 Th: 8 O = 1 Th: 2 O. *c*) 8. *d*) 4. *e*) 4. *f*) tetraédrico.

3-33 *a*) 4. *b*) No, los sitios son equivalentes. *c*) 1.3×10^8 átomos.

3-39 Contracción de 3.53%.

3-49 *c*) [301].

3-51 *A*: $[00\bar{1}]$. *B*: $[1\bar{2}0]$. *C*: $[\bar{1}11]$. *D*: $[2\bar{1}\bar{1}]$

3-58 *A*: $(1\bar{1}01)$. *B*: (0003). *C*: $(1\bar{1}00)$.

3-64 $[\bar{1}10]$, $[1\bar{1}0]$, [101], $[\bar{1}0\bar{1}]$, [011], $[0\bar{1}\bar{1}]$.

3-66 Tetragonal—4; ortorrómbica—2; cúbica—12.

3-68 *a*) (111). *b*) (210). *c*) $(0\bar{1}2)$. *d*) (218).

3-74 [100]: 0.35089 nm, 2.85 nm^{-1}, 0.866. [110]: 0.496 nm, 2.015 nm^{-1}, 0.612.
[111]: 0.3039 nm^{-1}, 3.291 nm^{-1}, 1. El [111] tiene un empaquetamiento cerrado.

3-76 (100): 1.617×10^{15}/cm^2, fracción de empaquetamiento 0.7854.
(110): 1.144×10^{15}/cm^2, fracción de empaquetamiento 0.555.
(111): 1.867×10^{15}/cm^2, 0.907. El (111) es un empaquetamiento cerrado.

3-78 4,563,000.

3-81 *a*) 0.2978 Å. *b*) 0.6290 Å.

3-83 *a*) 4. *b*) (1/2, 0, 0), (0, 1/2, 0), (0, 0, 1/2), (1/2, 1/2, 1/2). *c*) 0.79.

3-85 *a*) 6. *c*) 8. *e*) 4. *h*) 6.

3-88 Fluorita. *a*) 5.2885 Å. *b*) 12.13 g/cm^3. *c*) 0.624.

3-90 Cloruro de cesio. *a*) 4.1916 Å. *b*) 4.8 g/cm^3. *c*) 0.693.

3-92 (111): 1.473×10^{15}/cm^2, 0.202 (Mg^{+2}). (222): 1.473×10^{15}/cm^2, 0.806 (O^{-2}).

3-97 0.40497 nm.

3-99 *a*) CCCu. *c*) 0.2327 nm.

CAPÍTULO 4

4-3 4.98×10^{19} vacancias/cm^3.

4-5 *a*) 0.00204. *b*) 1.39×10^{20} vacancias/cm^3.

4-7 *a*) 1.157×10^{20} vacancias/cm^3. *b*) 0.532 g/cm^3.

4-11 0.344.

4-13 8.262 g/cm^3.

4-15 *a*) 0.0449. *b*) Un átomo de H por 22.3 celdas unitarias.

4-17 *a*) 0.0522 defectos por celda unitaria. *b*) 2.47×10^{20} defectos/cm^3.

4-24 *a*) $[0\bar{1}1]$, $[01\bar{1}]$, $[\bar{1}10]$, $[1\bar{1}0]$, $[\bar{1}01]$, $[10\bar{1}]$.

b) $[1\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$, $[\bar{1}\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$.

4-26 $(1\bar{1}0)$, $(\bar{1}10)$, $(0\bar{1}1)$, $(01\bar{1})$, $(10\bar{1})$, $(\bar{1}01)$.

4-28 $(111)[1\bar{1}0]$: b = 2.863 Å, d = 2.338 Å. $(110)[1\bar{1}1]$:

b = 7.014 Å, d = 2.863 Å. Radio = 0.44.

4-50 *a*) $K = 0.134$ MPa $\sqrt{\text{m}}$, $\sigma_0 = 415.72$ MPa. *b*) 712.94 MPa.

4-56 *a*) 21 granos/cm^2. *b*) 210,000 granos/cm^2.

4-57 9.3.

4-58 3.6.

4-62 0.0328°.

4-63 284 Å.

CAPÍTULO 5

5-10 1.08×10^9 saltos/s.

5-18 $D_H = 1.07 \times 10^{-4}$ cm^2/s contra $D_N = 3.9 \times 10^{-9}$ cm^2/s. Los átomos de H más pequeños se difunden más rápidamente.

5-20 3.88×10^{-12} cm^2/s.

5-23 *a*) 59,390 cal/mol. *b*) 0.057 cm^2/s.

5-29 2.75×10^{-6} cm^2/s; Al.

5-32 *a*) −0.02495 a% Sb/cm. *b*) -1.246×10^{19} Sb/(cm$^3 \cdot$ cm).

5-34 *a*) -1.969×10^{11} átomos de H/(cm$^3 \cdot$ cm).
b) 3.3×10^7 átomos de H/(cm$^2 \cdot$ s).

5-37 1.25×10^{-3} g/h.

5-39 −198°C.

5-49 23.3 años.

5-59 $D_0 = 3.47 \times 10^{-16}$ cm^2/s contra $D_{Al} = 2.48 \times 10^{-13}$ cm^2/s. Es más fácil que los iones pequeños de Al se difundan.

5-62 907°C o 1180 K.

5-63 7758 horas.

5-64 0.53% C.

5-66 190 s.

5-68 1184 s.

5-70 667°C.

5-78 50,488 cal/mol; sí.

CAPÍTULO 6

6-14 1100 lb o 4891 N.

6-16 49.7 MPa; 0.003.

6-31 *a*) 22.6 GPa. *b*) 206 nm.

6-34 *a*) $l_f = 30.00745$ cm, $d_f = 0.99993$ cm.

6-35 *b*) 378.5 MPa. *d*) 37.5% *f*) 309.6 MPa. *g*) 431.6 MPa.

6-39 *a*) 80 MPa. *b*) 91 MPa. *c*) 4158 MPa. *d*) 4.5%. *e*) 3.5%. *f*) 78 MPa. *g*) 0.53 MPa.

6-41 *a*) 274 MPa. *b*) 417 MPa. *c*) 172 GPa. *d*) 18.55%. *e*) 15.8%. *f*) 397.9 MPa. *g*) 473 MPa. *h*) 0.17 MPa.

6-47 *a*) 530 MPa. *b*) 152,380 MPa.

6-49 *a*) 41 mm; no se fracturará.

6-61 5.6 GPa.

6-71 No es sensible a las muescas; tenacidad deficiente.

CAPÍTULO 7

7-3 134 MPa.

7-8 0.99 MPa$\sqrt{\text{m}}$.

7-9 No; la prueba no será lo suficientemente sensible.

7-28 280 MPa; −140 MPa.

7-29 6.96 kg.

7-32 $d = 4.085$ cm.

7-34 22 MPa; máx = +22 MPa, mín = −22 MPa, medio = 0 MPa; una frecuencia más alta reducirá la resistencia a la fatiga debida al calentamiento.

7-36 *a*) 2.5 mm. *b*) 0.0039 mm.

7-40 $C = 2.061 \times 10^{-3}$; $n = 3.01$.

7-52 101,329 h.

7-54 $n = 6.82$. $m = -5.7$.

7-56 29 días.

7-58 1.3 cm.

7-62 907 kg.

CAPÍTULO 8

8-6 *a*) 1 — la pendiente es más aguda. *b*) 1 — es más fuerte. *c*) 2 — es más dúctil y menos fuerte.

8-9 528 MPa.

8-10 $n = 0.12$; CCCu.

8-12 $n = 0.15$.

8-13 0.56.

8-24 0.38 cm.

8-28 Alrededor de 407 MPa.

8-29 172 MPa de tensión, 145 MPa de fluencia, 6% de elongación.

8-31 Primer paso: 36% de TF que dan 172 MPa de tensión, 145 MPa de fluencia, 6% de elongación. Segundo paso: 64% TF que dan 193 MPa de tensión, 172 MPa de fluencia, 4% de elongación. Tercer paso: 84% TF que dan 207 MPa de tensión, 193 MPa de fluencia, 3% de elongación.

8-33 1.9 a 2.4 cm.

8-37 48% de TF, 179 MPa de tensión, 159 MPa de fluencia, 4% de elongación.

8-53 *a*) 641 kg. *b*) No se romperá.

8-55 ~3.2.

8-69 *a*) 550°C, 750°C, 950°C. *b*) 700°C. *c*) 900°C. *d*) 2285°C.

8-81 Pendiente = 0.4. Sí.

CAPÍTULO 9

9-11 35 mJ.

9-19 *a*) 6.65 Å. *b*) 109 átomos.

9-21 1.136×10^6 átomos.

9-38 *a*) 0.0333. *b*) 0.333. *c*) Todo.

9-39 1265°C.

9-44 31.15 s.

9-46 $B = 300$ s/cm^2, $n = 1.6$.

9-50 *a*) $\sim 4.16 \times 10^{-3}$ cm. *b*) 90 s.

9-51 $k = 0.003$ s, $m = 0.35$.

9-53 0.03 s.

9-62 *a*) 900°C. *b*) 430°C. *c*) 470°C. *d*) ~250°C/min. *e*) 9.7 min. *f*) 8.1 min. *g*) 60°C. *h*) Zinc. *i*) 14 min/cm^2.

9-72 *V/A* (mazarota) = 0.68, *V/A* (grueso) = 1.13, *V/A* (delgado) = 0.89; no efectivo.

9-75 $D_{Cu} = 3.7$ cm. $D_{Fe} = 3.25$ cm.

9-77 *a*) 46 cm^3. *b*) 4.1%.

9-83 23.04 cm.

9-84 −0.78%.

9-86 0.046 cm^3/100 g Al.

CAPÍTULO 10

10-23 3.7 kg Zn.

10-29 *a*) Sí. *c*) No. *e*) No. *g*) No.

10-33 El Cd debe dar la menor reducción en conductividad; ninguno debe dar solubilidad sólida ilimitada.

10-44 *a*) 2330°C, 2150°C, 180°C. *c*) 2570°C, 2380°C, 190°C.

10-48 *a*) 44 %pe Pd en L; 55 %p Pd en α; 45% L; 55% α

10-50 *a*) L: 15 mol% MgO o 8.69 %p MgO. S: 38 mol% MgO o 24.85 %p MgO. *b*) L: 78.26 mol% o 80.1 %p; S: 21.74 mol% o 19.9 %p MgO. *c*) 78.1 vol% L, 21.9 vol% S.

10-53 *a*) L: 15 mol% MgO o 8.69 %p MgO. S: 38 mol% MgO o 24.85 %p MgO. *b*) L: 78.26 mol% o 80.1 %p; S: 21.74 mol% o 19.9 %p MgO. *c*) 78.1 vol% L, 21.9 vol% S.

10-55 750 g Ni, Ni/Cu = 1.62.

10-57 331 g MgO.

10-59 64.1 %p FeO.

10-61 *a*) 49 %p de W en L, 70 %p W en α. *b*) No es posible.

10-63 96 kg W; 544 kg W.

10-65 Ni se disuelve; cuando el líquido alcanza 10% en peso de Ni, el baño empieza a solidificarse.

10-70 *a*) 2900°C, 2690°C, 210°C. *b*) 60% de L con 49% W, 40% a con 70% W.

10-72 *a*) 55% W. *b*) 18% W.

10-76 *a*) 2900°C. *b*) 2710°C. *c*) 190°C. *d*) 2990°C. *e*) 90°C. *f*) 300 s. *g*) 340 s. *h*) 60% W.

10-79 *a*) 2000°C. *b*) 1450°C. *c*) 550°C. *d*) 40% FeO. *e*) 92% FeO. *f*) 65.5% de L con 75% FeO, 34.5% de S con 46% FeO. *g*) 30.3% de L con 88% FeO, 69.7% de S con 55% FeO.

10-80 *a*) 3100°C. *b*) 2720°C. *c*) 380°C. *d*) 90% W. *e*) 40% W. *f*) 44.4% de L con 70% de W, 55.6% de α con 88% W. g) 9.1% de L con 50% W, 90.9% α con 83% W.

CAPÍTULO 11

11-11 *a*) θ, no estequimétrica. *b*) α,β,γ,η. B es alotrópica, existe en tres formas diferentes a distintas temperaturas. c) 1100°C: peritéctica. 900°C: monotéctica. 690°C: eutéctica. 600°C: peritectoide. 300°C: eutectoide.

11-15 *c*) $SnCu_3$.

11-16 $SiCu_4$.

11-19 *a*) 2.5% Mg. *b*) 600°C, 470°C, 400°C, 130°C. *c*) 74% α con 7% Mg, 26% de L con 26% Mg. *d*) 100% α con 12% Mg. *e*) 67% α con 1% Mg, 33% β con 34% Mg.

11-21 *a*) Hipereutéctica. *b*) 98% Sn. *c*) 22.8% de β con 97.5% Sn, 77.2% de L con 61.9% Sn. *d*) 35% α con 19% Sn, 65% β con 97.5% Sn. *e*) 22.8% de β primaria con 97.5% Sn, 77.2% eutéctica con 61.9% Sn. *f*) 30% α con 2% Sn, 70% β con 100% Sn.

11-30 *a*) Hipoeutéctica. *b*) 1% Si. *c*) 78.5% α con 1.65% Si, 21.5% de L con 12.6% Si. *d*) 97.6% α con 1.65% Si, 2.4% β con 99.83% Si. *e*) 78.5% α primaria con 1.65% Si, 21.5% eutéctica con 12.6% Si. *e*) 21.5% eutéctica con 12.6% Si. *f*) 96% α con 0% Si, 4% β con 100% Si.

11-32 56% Sn, hipoeutéctica.

11-34 52% Sn.

11-36 17.5% Li, hipoeutéctica.

11-38 60.5% α, 39.5% β; 27.7% α primaria, 72.3% eutéctica; 0.54.

11-40 *a*) 1150°C. *b*) 150°C. *c*) 1000°C. *d*) 577°C. *e*) 423°C. *f*) 10.5 min. *g*) 11.5 min. *h*) 45% Si.

CAPÍTULO 12

12-3 $c = 8.9 \times 10^{-6}$, $n = 2.81$.

12-16 1.73.

12-30 *a*) Para Al −4% Mg: trate con solución entre 210 y 451°C, temple y envejezca debajo de 210°C. Para Al −6% Mg: trate con solución entre 280 y 451°C, temple y envejezca debajo de 280°C. Para Al −12% Mg: trate con solución entre 390 y 451°C, temple y envejezca debajo de 390°C. *c*) Los precipitados no son coherentes.

12-46 *a*) Tratar por solución entre 290 y 400°C, temple y envejezca debajo de 290°C. *c*) No es un buen candidato. *e*) No es un buen candidato.

12-61 27.6%.

12-62 *a*) 795°C. *b*) Ferrita primaria. *c*) 56.1% de ferrita con 0.0218% de C y 43.9% de austenita con 0.77% de C. *d*) 95.1% ferrita con 0.0218% de C y 4.9% de cementita con 6.67% de C. *e*) 56.1% de ferrita primaria con 0.0218% de C y 43.9% de perlita con 0.77% de C.

12-64 0.53% de C, hipoeutectoide.

12-66 0.156% de C, hipoeutectoide.

12-68 0.281% de C.

12-70 760°C, 0.212% de C.

12-74 *a*) 900°C; 12% de CaO en tetragonal, 3% de CaO en monoclínico, 16% de CaO en cúbico; 30.8% monoclínico, 69.2% cúbico. *c*) 250°C; 47% de Zn en β', 36% de Zn en α, 59% Zn en γ; 52.2% de α, 47.8% de γ.

12-86 *a*) 615°C. *b*) 1.67×10^{-5} cm.

12-88 Bainita con DRD 47.

12-90 Martensita con DRC 66.

12-102 *a*) 37.2% de martensita con 0.77% de C y DRC 65. *c*) 84.8% de martensita con 0.35% de C y DRC 58.

12-104 *a*) 750°C. *b*) 0.455% de C.

12-106 ~3% expansión.

12-108 Austenitizar a 750°C, templar y revenir arriba de 330°C.

CAPÍTULO 13

13-4 *a*) 97.8% ferrita, 2.2% cementita, 82.9% ferrita primaria, 17.1% perlita.
c) 85.8% ferrita, 14.2% cementita, 3.1% cementita primaria, 96.9% perlita.

13-10 Para 1035: $A_1 = 727°C$; $A_3 = 790°C$; recocer = 820°C; normalizar = 845°C; recocido de proceso = 557 −647°C; usualmente no es esferoidizado.

13-14 *a*) Ferrita y perlita. *c*) Martensita. *e*) Ferrita y bainita. *g*) Martensita templada.

13-16 *a*) Austenitizar a 820°C, mantener a 600°C por 10 s, enfriar.
c) Austenitizar a 780°C, mantener a 600°C por 10 s, enfriar.
e) Austenitizar a 900°C, mantener a 320°C por 5000 s, enfriar.

13-20 *a*) Austenitizar a 820°C, templar y revenir entre 420 y 480°C; 1034 a 1241 MPa de tensión, 965 a 1103 MPa de fluencia.
b) 1207 a 1241 MPa de tensión, 896 a 931 MPa de fluencia.
c) 690 MPa de tensión, 448 de fluencia, 20% elongación.

13-22 0.48% de C en martensita; austenitizada a 770°C; debe austenitizarse a 860°C.

13-24 1080: perlita fina. 4340: martensita.

13-29 Puede hacerse hipereutectoide con cementita de límite de grano.

13-33 *a*) No es aplicable. *c*) 8 a 10°C/s. *e*) 32 a 36°C/s.

13-35 *a*) 16°C/s. *b*) Perlita con DRC 38.

13-37 *a*) Perlita con DRC 36. *c*) Perlita y martensita con DRC 46.

13-39 *a*) 3.25 cm. c) 4.75 cm. *e*) Mayor a 6.25 cm.

13-44 0.30 h.

13-48 0.05 mm: perlita y martensita con DRC 53. 0.15 mm: perlita mediana con DRC 38.

13-53 Ferrita δ; solidificación sin equilibrio; recocer.

13-58 2.4%. Sí.

CAPÍTULO 14

14-6 La β presente en el microconstituyente eutéctico fragiliza la aleación.

14-10 27% β contra 2.2% β.

14-14 *a*) 0.283 cm, 6.85×10^{-3} kg, \$0.023.
b) 0.283 cm, 0.0106 kg, \$0.014.

14-19 Al: 340%. Mg: 31%. Cu: 1004%.

14-22 El plomo puede fundirse durante el trabajo en caliente.

14-26 γ' porque es más pequeña y más numerosa que el carburo.

14-29 Ti-15% V: 100% de β se transforma a 100% de α', que entonces se transforma en precipitado de 24% de β en una matriz α. Este es un proceso de templado y revenido.
Ti-35% V: 100% de β se transforma en 100% de β_{ss}, que entonces se transforma en precipitado de 27% de α en una matriz β. Este es un proceso de envejecimiento por endurecimiento.

14-31 Al: 18.8×10^5 cm. Cu: 13.3×10^5 cm. Ni: 8.5×10^5 cm.

14-33 Se desprende; se agrieta.

CAPÍTULO 15

15-4 1029%.

15-10 0.79.

15-17 $\beta = 2.4$; porosidad verdadera = 22.58%; fracción = 0.557.

15-18 735 g.

15-20 1.324.

15-37 1.276 kg BaO; 0.249 kg Li_2O.

15-39 2.18; 10.32% Na_2O, 4.67% CaO, 85.01% SiO_2.

CAPÍTULO 16

16-10 327; 405.

16-12 *a*) 2500. *b*) 2.4×10^{18}.

16-15 *a*) 211. *b*) 175.

16-21 Polibutadieno y silicona; la T_g debe ser menor de −78°C.

16-23 Polietileno y polipropileno.

16-28 91°C.

16-32 9 MPa.

16-33 1.055×10^5 cal/mol.

16-35 Si $\varepsilon = 1$, $E = 6$ MPa; si $\varepsilon = 4$, $E = 14$ MPa.

CAPÍTULO 17

17-9 7.8×10^{13} por cm^3.

17-11 2.48%.

17-16 9.41 g/cm^3.

17-19 *a*) 0.507. *b*) 0.507. *c*) 7.77 g/cm^3.

17-21 11.2 a 22.2 kg.

17-29 *a*) 2.56 g/cm^3. *b*) 200,000 MPa. *c*) 104,800 MPa.

17-32 188 MPa.

17-34 Para $d = 20$ μm, $l_c = 0.30$ cm, $l_c/d = 150$. Para $d = 1$ μm, $l_c = 0.15$ cm, $l_c/d = 1500$.

17-45 El agarre mejora la resistencia.

17-47 Pirolizar a 2500°C; 1724 MPa

17-53 $E_{\text{paralelo}} = 69{,}226$ MPa; $E_{\text{perpendicular}} = 20{,}409$ MPa.

17-55 $E_{\text{paralelo}} = 81{,}775$ MPa; $E_{\text{perpendicular}} = 68{,}950$ MPa.

17-57 0.417 g/cm^3; 20.0 kg contra 129.6 kg.

CAPÍTULO 18

18-3 *a*) 0.99 litros. *b*) 0.77 g/cm^3.

18-6 0.4995 cm.

18-8 Se expande 209.8 cm perpendicular a los tablones.

18-10 0.48.

18-13 *a*) 640 sacos, 48,898.1 kg arena, 100,700 kg agregado, 7701 litros. *b*) 2360 kg/m^3. *c*) 1 : 1.79 : 3.58.

CAPÍTULO 19

19-2 13,433 ohm.

19-4 *a*) 3377 W. *b*) 3.183×10^{14} W.

19-7 $d = 0.0864$ cm; 1174 V.

19-10 7.8×10^{11} cm^{-3}.

19-12 0.0234 km/h; 0.0146 millas/h.

19-16 2.5×10^{-5} ohm · cm

19-18 3.03×10^5 ohm^{-1} · cm^{-1} a -50°C; 0.34×10^5 ohm^{-1} · cm^{-1} a 500°C.

19-20 -81.8°C.

19-24 A 400°C, $\rho = 41.5 \times 10^{-6}$ ohm · cm; $\rho_d = 8.5 \times 10^{-6}$ ohm · cm; $b = 1.79 \times 10^{-4}$ ohm · cm. A 200°C, $\rho = 3.8 \times 10^{-5}$ ohm · cm.

19-28 *a*) n(Ge) $= 2.51 \times 10^{13}$ por cm^3. *b*) f(Ge) $= 1.42 \times 10^{-10}$. *c*) n_0(Ge) $= 1.14 \times 10^{19}$ por cm^3.

19-30 Sb: 10.8 ohm^{-1} · cm^{-1}. In: 3.8 ohm^{-1} · cm^{-1}.

19-37 2600%.

19-43 Be: 2.92×10^4 ohm^{-1} · cm^{-1}

19-49 *a*) 4.85×10^{-19} m. *c*) 1.15×10^{-17} m.

19-51 9.4 V.

19-55 0.001239 μF.

CAPÍTULO 20

20-6 Fe: 39,604 Oe. Co: 31,573 Oe.

20-13 1194.

20-15 6068 Oe.

20-17 8000 G; 1.49 mA.

20-32 *a*) 13,000 G. *b*) 14,000 G. *c*) 800 Oe. *d*) 5.8 G/Oe. *e*) 15.6 G/Oe. *f*) 6.3×10^6 G Oe.

20-44 15×10^6 G · Oe.

20-46 33 kJ/m^3.

20-48 Inductancia de saturación elevada.

20-51 4.68×10^5 A/m.

CAPÍTULO 21

21-12 1.94×10^8 m/s.

21-13 Hielo, agua, teflón.

21-17 4%; 0.35%.

21-19 *a*) 6.56°. *b*) 6.65°. *c*) 10°. *d*) 0.18 cm.

21-20 25.84°.

21-21 0.25.

21-23 0.0117 cm.

21-34 0.37 I_0.

21-36 1.84×10^{-5} s.

21-40 *a*) 13.1×10^{-5} cm. *b*) 77.6×10^{-5} cm.

21-42 1.85×10^{-4} cm; infrarrojo.

21-45 13,800 V.

21-47 7480 V.

21-49 *a*) 24,825 V. *b*) Cu, Mn, Si.

CAPÍTULO 22

22-4 3.73 BTU/(lbm · °R).

22-7 *a*) 1900 cal, 7950 J. *c*) 8500 cal, 35,564 J.

22-9 0.0375 cm.

22-11 0.43 cm.

22-12 1.975 m.

22-15 15.182 m.

22-18 Latón: 25.0615 cm, Invar: 25.005 cm.

22-22 1757 MPa; tensión.

22-24 No; 169 MPa; 0.0245 cm disminución en longitud.

22-28 19.2 kW/m^2.

22-31 *a*) 78.5×10^6 cal/día. *b*) 47.09×10^6 cal/día.

22-34 19.6 min.

22-38 Hojuelas de grafito interconectadas en hierro gris.

CAPÍTULO 23

23-3 Corrosión grafítica.

23-7 −0.172 V.

23-8 6.5 M

23-10 0.000034 g/1000 mL.

23-11 2.5 horas

23-13 0.055 A/cm^2; 55 A.

23-15 34 años.

23-17 187.5 g Fe perdidos/hora.

23-23 La aleación 1100 es ánodo y continua para proteger la 2024; la aleación 1100 es cátodo y la 3003 se corroerá.

23-25 Al, Zn, Cd.

23-27 Agrietamiento de corrosión por esfuerzo.

23-29 El Ti es el ánodo; el carbono es el cátodo.

23-33 El níquel trabajado en frío se corroerá más rápidamente; el níquel recocido se corroerá más lentamente.

23-37 *a*) 12.2 g/h. *b*) 1.22 g/h.

23-39 Casi todas las cerámicas ya son óxidos.

23-41 698°C.

ÍNDICE

A

Abrasivos, 622
Absorción, 760-762
  transmisión o reflexión selectiva, 766
Acero inoxidable, 325, 350, 485-487
  austenítico, 486-487
  dúplex, 487
  ferrítico, 486
  martensítico, 486
Aceros, 443-444
Adhesivos, 604-605
  conductores, 605
  de fusión en caliente, 605
  para evaporación (difusión), 605
  químicamente reactivos, 604-605
  sensibles a la presión, 605
Agregados, 668-669
Aislantes y sus propiedades dieléctricas, 708
Aleaciones, 350, 525
  con memoria de forma, 447-448
  de aluminio, 504-510
  de cobre, 511-514
  de magnesio y berilio, 510-511
  de titanio, 518-524
Aleaciones de níquel y cobalto, 515-517
  efecto de la temperatura en, 516
  superaleaciones, 515-516
Aleaciones endurecidas por exceder el límite de solubilidad, 426-428
  ángulo diedro, 427
  estructura Widmanstätten, 426
  precipitado coherente, 427-428
  relaciones de energía interfacial, 426-427
Aleaciones eutécticas
  resistencia de las, 401--406
Aleaciones no ferrosas, 502-529
  de aluminio, 504-510
  de cobre, 511-514
  de níquel y cobalto, 515-517
  de titanio, 518-524
Aleaciones que exceden el límite de solubilidad, 392
Alótropos, 22, 40
Alúmina, 535-537
Aminas, 604
Anión, 34
Ánodos, 802
Aramidas, 587
Asfalto, 674
Austenita, 435
Austenitización, 466

B

Bainita, 441
Bases, 55
Bigotes, 619, 637
Bimetálicos, 648
Bingham, 203-204
  clasificación atómica de, 59-60
  cristalización de, 59
  cristalización inducida por esfuerzo, 59, 104
  formación por soplado y estiramiento, 59
  material amorfo, como, 59-60, 104
  polimerización de, 9-10, 19
Bitumen, 674
Borde (arista) de absorción, 761

C

Calor específico, 312
Cambium, 661
Campo eléctrico (*E*), 681
Capacidad térmica y calor específico, 782-784
Capas, 562, 816
Carbonización, 636-637
Carbonitruración, 483
Carburización, 482
Catión, 34
Cátodos, 802
Cavitación, 826
Celda electroquímica, 802-803
Celda unitaria, direcciones y planos, 67-73
Celdas de composición, 810
Celulosa, 660

Cementación, 562
Cementita, 435
Cementos, 562
Cerámicas, 8-9, 530-569
  conductividad térmica, 790-791
  defectos, 541-544
  disolución y oxidación, 802
  funciones y aplicaciones, 532-533
  límites en, 533-535
  refractarias, 560-562
  sinterizado, 533-535
  vidrios inorgánicos, 551-557
  vidrios-cerámicos, 557-558
Cermets, 544-545
Ciencia de materiales, 4
Ciencia e ingeniería de materiales, 4
Cinética, 423
Clasificación de los materiales, 7
  con base en la estructura, 12
  funcional, 10
Coeficiente de expansión térmica (CET), 39
Coeficiente de iones en diferentes óxidos, 156
Coeficientes, 157
Coercitividad, 733
Choque térmico, 792-793
Colada continua, 327-330
Comportamiento
  evaluación de la termofluencia, 254-256
  isotrópico y anisotrópico, 75
  mecánico a escalas pequeñas de longitud, 213-215
Composición, 4-6
Composición de cada fase, 362-365
Compuestos, 616-657
  estructuras tipo emparedado o sándwich, 648-649
  intermetálicos, 387-389
  laminares, 646-648
  manufactura de fibras y, 636-640
  particulados, 621-625
  reforzados con fibras y características, 625-636
  reforzados por dispersión, 619-621
Compuestos laminares
  ejemplos y aplicaciones, 647-648
Concreto
  agregado, 668-669
  arena, 668
  cementos hidráulicos, 667
  cementos no hidráulicos, 667
  composición, 671-672
  materiales de, 667-669
  posesforzado, 712-713
  propiedades, 669-673
  reforzado y presforzado, 673
  relación agua-cemento, 669-670
Condensadores, 702
Conducción, 687
Conductividad
  de metales y aleaciones, 689-692
  térmica, 788-792
Conductividad en otros materiales, 706-708
  materiales iónicos y, 706
  polímeros y, 707-708
Contenido de humedad
  y densidad de la madera, 662-663
Copolímeros, 355, 586-587
Corriente de corrosión y polarización, 809-810
Corrosión, 13
  corriente y polarización, 809-810
  diseño de sistemas de protección contra, 819
  electroquímica, 802-805
  potencial de electrodo en celdas electroquímicas, 805-809
  protección contra la electroquímica, 815-820
  química, 800-802
  y desgaste, 798-831
  y polarización, 809-810
Corrosión electroquímica
  protección contra, 815-820
  tipos de, 810-814
Crecimiento, 422-423
Crecimiento de grano, 167-169, 286-287
  fuerza impulsora del, 168
Cristalografía, 55
Curvas
  de enfriamiento, 318-319

D

Defectos o imperfecciones, 103-104
  endurecimiento de segunda fase, 129
  endurecimiento por precipitación, 129
  endurecimiento por tamaño del grano, 129
  en las cerámicas cristalinas, 538-541
  importancia de, 128-130
  intersticiales, 107-109
  otros puntuales, 109-111
  puntuales, 104
  superficiales, 122-128
  sustitucionales, 109
Defectos de solidificación, 321-325
  acero inoxidable, 325
  cavidades, 321

descarburización de argón oxígeno, 325
ley de Sievert
porosidad de gas, 323-325
Deformación
de polímeros cristalinos, 597
plástica, 117, 184
verdadera, 197-199
Degradación microbiana
y polímeros biodegradables, 820-821
Densidad, 14, 64-65
Densidad de dislocación, 118
Deposición de películas delgadas, 705-706
Desgaste y erosión, 824-826
Designaciones y clasificación de los aceros, 462-465
Deslizamiento, 114-117
Diagrama
de fases unario, 351-352
de transformación isotérmica (TI), 440
Diagramas de fases, 350-353
aceros inoxidables, 350
aleaciones, 350
diseño de componentes aeroespaciales, 353
equilibrio de punto triple, 352
que contienen reacciones de tres fases, 389-391
regla de fase, 350-353
relación entre las propiedades y, 367-368
unario, 351-352
Diagramas de tiempo-temperatura-transformación, 440
Diamante
estructura del, 41
impurezas, 539
y grafito, 20
Dieléctricas
constante, 684
pérdidas, 710
resistencia, 711
Dieno, 598
Difracción
de rayos X, 87-88
de rayos X y análisis de datos, 89-90
ley de Bragg, 87
técnicas de análisis de estructuras cristalinas, 87-91
y microscopía de electrones 90-91
Difusión, 141-142
factores que afectan la, 153-159
y procesamiento de materiales, 165-169
Difusión, aplicaciones, 142-145
difusión de dopantes para dispositivos semiconductores, 142
fibras ópticas y componentes microelectrónicos, 144
oxidación del aluminio, 143
Difusión y procesamiento de materiales, 165-169
crecimiento de grano, 167-169
crecimiento de grano anormal, 169
crecimiento de grano normal, 168-169
fuerza impulsora, 168
límite de difusión, 169
sinterización, 165-167
Difusividad, 150
Dipolos y momentos magnéticos, 724
Direcciones en celdas unitarias, 67-68
Direcciones y planos de construcción, 72-73
Diseño y selección de materiales, 14
Dislocaciones, 111-117
esfuerzo de Peierls-Nabarro, 114
mezcladas, 112-113
movimiento, 112-114
vectores de Burgers, 111, 114-116
Distancia repetitiva, 69
Dominios, 732
límites de, 127-128
movimiento en campo magnético, 732
Dopantes, 104, 680
Ductilidad, 195-196
Dureza
comparación de pruebas de, 203
de los materiales, 202-203
macrodureza, 202
prueba de Brinell, 202
prueba de microdureza, 203

E

Efectos
ambientales y diversos, 12
de la rapidez de deformación, 207-208
de la temperatura y del tiempo de envejecimiento, 432-433
de los elementos de aleación, 475-477
Elastómeros (caucho), 184, 574, 598-602
enlace cruzado, 598-599
isómeros geométricos, 598
propiedades de, 601
termoplásticos (TPE), 600-602
unidades de repetición, 601
vulcanización, 598
Electroestricción
piezoelectricidad y ferroelectricidad, 712-715
Electrolitos, 803
Embrión, 308
Emisión térmica, 774-775

Endurecimiento por envejecimiento, 428-429
requerimientos del, 433
Endurecimiento por dispersión
principios y ejemplos del, 386-387
Energía
de activación de la difusión, 148-149
de unión y espaciado interatómico, 37
Fermi, 686-687
Enlace atómico, 31-37
anión, 34
catión, 34
enlaces covalentes, 32-33
enlaces de hidrógeno, 35
enlaces de van der Waals, 34-37
enlaces iónicos, 34
enlaces metálicos, 31-32
enlaces primarios, 34-35
enlaces secundarios, 35
relación direccional, 32
Enlace en los materiales cerámicos, 533-535
Epóxicos, 604
Esfuerzo verdadero, 197-199
Esfuerzos, 112
cristalización inducida por, 54, 587
curvas de ruptura por, 256
espaciado interplanar, 76
número de ciclos de falla, 247
relajación, 185
Espectro electromagnético, 754
Estabilidad atómica y electronegatividad, 28
Estabilidad de átomos y iones, 145-146
Arrhenius, 146
Estabilización, 818
Estadística de Weibull, 241-244
Estructura, 4, 21
compacta hexagonal, 65
de la madera, 660-662
de la pieza colada, 319-321
de las bandas de sólidos, 685-688
de los materiales, 22
de los materiales cerámicos cristalinos, 535-538
del átomo, 25
del dominio y el ciclo de histéresis, 731-734
electrónica del átomo
Estructura atómica, 25-28
masa atómica, 25
número atómico, 25
Estructuras
covalentes, 84-87
tipo emparedado, 648-649
Estructuras cristalinas
de los materiales iónicos, 78-83
Eutécticos
y procesamiento de materiales, 406-407
Evolución microestructural
en endurecimiento por envejecimiento, 429-431
Expansión térmica, 784-788
Extrusión, 270, 546-547, 605-607

F

Factor de empaquetamiento, 63-64
Falla
de Griffith, 233
por fatiga, 13
Fallas en los materiales cerámicos, 541-544
Fase
estabilidad de, 476
regla de, 350-353
transformaciones de, 514
Fatiga, 13, 245-249
análisis de falla por, 245
aplicación de pruebas de, 249-252
efectos de la temperatura en, 252
estriaciones, 246
prueba de, 247
resistencia a, 248
resultados de pruebas de, 247-249
superficie de fractura, 246
vida de, 248
Fenómenos de emisión
ejemplos y uso de, 766, 775
Ferrita, 435
Ferroelectricidad, 127
Ferrimagnetismo, 730
Ferromagnetismo, 730
Fibras y manufactura de compuestos, 636-640
carbonización, 636-637
deposición de vapor químico, 636
elaboración de, 636-638
precursores, 637
producción de compuestos, 638-640
Fibras, 563
estructura, 661
textura, 279
Fluorescencia, 772
Formación de núcleos (nucleación), 307-310, 422
aplicación de la controlada, 311-312
crecimiento, 308
embrión, 308
heterogénea, 310
homogénea, 308-310

interfacial, 307
radio crítico, 308
rapidez de, 310
subenfriamiento, 308
y crecimiento en reacciones en estado sólido, 422-426
Formas del carbono, 40-44
Fractura
características microestructurales en materiales metálicos, 236-239
características microestructurales en cerámicas, 239-241
diseño de cerámica de soporte, 235
diseño de componentes, 233
diseño de manufactura y prueba y, 233
fisura de Griffith, 233
importancia de la mecánica de. 233-236
mecánica de la, 230-236
Fuente de Frank-Read, 274-275
Fuerzas de London, 35
Fundición, 165

G

Glasfalto, 674
Gradiente de concentración, 150-151
Grafito
corrosión, 801
estructura, 42
Granos, 53
Grietas, 249-251

H

Hemicelulosa, 660
Hierro
corrosión, 808
diseño de membrana de, 155-156
Hierros fundidos, 488-493

I

Imanes permanentes, 724, 738-741
Importancia tecnológica, 182-183
Índice de refracción, 756-757
Índices de Miller, 67, 70-71
de celdas unitarias hexagonales, 73-74
Inhibidores, 816-817
Inoculación, 311, 492
Inoculantes, 311
Interacciones de
Debye, 35
Keesom, 35
Interdifusión, 147
Intersticialmente, 109

L

Laminar, 395
Láseres (aplicación de luminiscencia), 773-774
Ley de
Fick, primera, 149-150
Fick, segunda, 160-162
Hooke, 192
Ohm y conductividad eléctrica, 681-685
Schmid, 118-120
Sievert, 323
Lignina, 660
Límite
de ángulo pequeño, 126
de grano y, 53, 122-123
de longitud de onda corta, 767
de solubilidad, 354-355
elástico, 190
proporcional, 190
Lingotes, 319
estructura de, 319
Luminiscencia (interacciones de la capa electrónica exterior), 772-773

M

Macrodureza, 202
Macroestructura, 22, 661-662
Macrosegregación, 372
Madera
celulosa, 660
contenido de humedad y densidad, 662-663
contrachapada (triplay), 662
dura contra blanda, 662
estructura celular, 661
estructura de fibra, 661
expansión y contracción, 666
macroestructura, 699-700
propiedades mecánicas, 664-665
Magnetización (M), 727
Magnetización, permeabilidad y campo magnético, 726-729
Magnetón de Bohr, 724
Magnetorrestricción, 746
Materiales
cristalinos, 53
diamagnéticos, 729
diseño y selección, 14
estructurales, 12
fotónicos u ópticos, 12
inteligentes, 12
otros cerámicos, 562-564
propiedades físicas, 14
propiedades mecánicas, 14

propiedades térmicas, 780-797
selección, componentes de polímeros, 575
Materiales amorfos, 54
vidrios, 54
vidrios metálicos, 54
solidificación rápida, 54
Materiales compuestos
endurecidos por dispersión, 619-621
laminares, 646-647
Materiales de construcción, 658-677
asfalto, 674
concreto, 667-669
madera contrachapada (triplay), 666
Materiales electrónicos, 678-721
aplicaciones de los semiconductores, 699-702
aislantes y propiedades dieléctricas, 708
conductividad de otros materiales, 706-708
procesamiento de circuitos integrados, 702-704
semiconductores, 692-699
Materiales magnéticos, 722-751
aplicaciones, 735-741
clasificación, 724
dipolos, 724-726
ferrimagnetismo, ferromagnetismo, 729-731
temperatura de Curie, 734
Materiales viscoelásticos, 185
Mecanismos
de crecimiento, 312-314
de difusión, 147-148
del endurecimiento por deformación, 274-276
Metales
conductividad térmica, 789-790
refractarios y preciosos, 524-525
y aleaciones, 8
Metales y conductividad de aleaciones, 689-692
Metalografía, 123-124
Microestructura, 4-6, 22
endurecimiento por textura, 278-282
Microsegregación, 372
Módulo de
corte, 199
elasticidad, 38-39, 184, 626-627
resistencia, 194
Young, 184
Monel, 515
Monómero, 572
Movilidad, 681
Nanoalambres
y el diagrama de fases eutécticas, 408-410
Nanocompuestos, 618
Nanociencia, 22
Nanoestructura, 22
Nanoindentación, 203-206
Nanotecnología, 22
Nitinol, 443
Nitruración, 482-483
Normalización, 466
Notación de Kroger-Vink, 110-111
Núcleos, 25
Número de átomos por celda unitaria, 59
Número de coordinación, 63

O

Oligómeros, 572
Orden de corto y de largo alcances, 52-53
Oxidación, 524
reacción de, 822
y otras reacciones gaseosas, 821-824

P

Paramagnetismo, 729-730
Parámetros de red, 58-59
Parisón, 607
Pasivación o protección anódica, 817
Perfil de composición, 160-165
Perlita, 436
Permisividad, 711
Planos en celda unitaria, 70
Planos y direcciones compactos, 74-75
Plásticos, 572
Polarización, 709,
Polarización en dieléctricos, 708-712
condensador, 709
dieléctrica lineal y no lineal, 711-712
fortaleza dieléctrica, 711
pérdidas dieléctricas, 710
permisividad, 711
Poliésteres, 604
Poliímidas, 604
Polimerización, 9
por adhesión y condensación, 575-579
Polímeros, 9, 570-615, 623-624
adhesivos, 604-605
ataques químicos, 802
clasificación, 572-575
conducción, 707-708
conductividad térmica, 791
elastómeros, 598-602
grado de polimerización, 579-581
oxidación y degradación térmica, 824
permeabilidad, 159-160
procesamiento y reciclaje, 605-609
termoestables o termofijos, 602-604

Polvos, 544
Porcentaje de elongación, 196
Porosidad, 542-543
Potencial del electrodo
  efectos de concentración en, 805
Potencial de electrodo en celdas electroquímicas, 805-809
  corrosión del hierro, 808
  ecuación de Faraday, 807
  ecuación de Nernst, 805
Precipitados, 386
Precursor, 637
Preformas, 638
Principio de Aufbau, 27
Procesamiento
  de un circuito integrado, 702-704
  y aplicaciones de productos de arcilla, 558-560
Procesos
  de vaciado para fabricar componentes, 325-327
Propiedades
  mecánicas de la madera, 664-665
  que se descubren a través de la prueba de tensión, 190-197
  que se descubren a partir de la prueba de impacto, 208-210
Protección catódica, 817
Prueba
  Brinell de dureza, 202
  de dureza Rockwell, 202
  de dureza Vickers, 202
  de flexión de materiales quebradizos, 199-202
  de tensión, 185-190
Pruebas no destructivas, 234
Puntos, 67-76
  de coordenadas, 67
  índices de Miller, 67, 70-71
  índices de Miller-Bravais, 73-74
  planos en celda unitaria, 70

R

Radio, 79
Radio atómico frente a parámetro de red, 59-62
Rayos gamma (interacciones nucleares), 766-767
Rayos X (interacciones de la capa electrónica interior), 767-771
Reacción eutectoide, 434-438
  austenita, 435
  cementita, 435
  martensita, 475-479, 482
  microconstituyentes primarios, 437-438
  perlita, 436
  soluciones sólidas, 435
Reacción martensítica y revenido, 443-447
Reacciones
  monotécticas, 391
  peritécticas, 391
Recalescencia, 319
Reciclaje de plásticos, 609
Recocido
  control del, 287-289
  las tres etapas del, 285-287
  y procesamiento de materiales, 289-291
Recristalización, 286
Red, base, caldas unitarias, 54-57
Reflectividad, 760
Reflexión, 759-760
Refracción, 755--759
  coeficiente de absorción lineal, 757
  diseño de sistemas de fibra óptica, 758-759
  índice de, 756-757
  reflexión, absorción y transmisión, 754-766
Refractarios, 560-562
Regla de Chvorinov, 314
Reglas de Hume-Rothery, 356
Remanencia, 732
Reología de los líquidos, 215-217

S

Segregación, 370
Semiconductores, 10, 692-699
  aplicaciones, 699-702
  de brecha, 699
  diseño, 698-699
  extrínsecos, 692-693
  intrínsecos, 692
  neutralidad de carga, 697-698
  recombinación radiactiva, 699
  tipo *n*, 696
  tipo *p*, 696
Sensibilización, 818
Sílice
  y silicatos compuestos, 549-551
Sinterización, 165-167, 544, 547-549
Síntesis y procesamiento, 4-6
  de los materiales cerámicos cristalinos, 544-549
Sistemas
  de comunicaciones por fibra óptica, 775
  reforzados con fibras y sus aplicaciones, 640-646
Sitios
  intersticiales, 76-78
  par carbono en hierro, 107-109

Sodio, estructura de banda de, 686-687
Soldabilidad
del acero, 484-485
Soldadura, 333
Solidificación, 306
de polímeros, 332-333
de una aleación de solución sólida, 368-370
direccional, 331-332
efecto en la estructura y propiedades, 315-318
fuera de equilibrio en el sistema eutéctico, 407-408
principios de, 304-347
y segregación fuera de equilibrio, 370-373
Sólidos, estructura de banda de, 685-688
Solidus, 361
Solubilidad y soluciones sólidas, 353-356
copolímeros, 355
sistemas poliméricos, 355-356
solubilidad limitada, 354-355
solubilidad ilimitada, 353-354
Solución sólida, 348, 435
aleaciones de, 392
endurecimiento por, 357-359
solidificación de la aleación de, 368-370
Soluciones sólidas y equilibrio de fase y, 348-383
diagramas de fase isomorfa, 359-367
diagramas de fase y de fases, 350-353
relación entre propiedades y diagrama de fase, 367-368
solidificación y segregación fuera de equilibrio, 370-371
solubilidad y soluciones del sólido, 353-356
Soluto, 348-349
Superaleaciones, 515-516
Supercalor, 308
Superconductores, 680
Superparamagnetismo, 731

T

Tabla periódica de los elementos, 29-31
Técnicas
de difracción del análisis de estructuras cristalinas, 87-90
Tecnologías energética y ambiental, 11
Temperatura, 13
efecto de la, 180, 197-197, 252, 255, 516, 520
y coeficiente de difusión, 153-154
Templabilidad
aplicación de la, 477-480
Tendencias en propiedades, 29
Terminología de las propiedades mecánicas, 183-185
deformación plástica, 184
elastómeros, 184
material anelástico, 185
material viscoso, 184-185
material viscoelástico, 185
módulo de elasticidad, 184
módulo de Young, 184
tensión, 183
Termofluencia
ruptura y corrosión por esfuerzo, 252-254
uso de datos de la, 256-257
Termoformado, 607
Termoplásticos, 275, 573
efecto de la temperatura en, 587-593
envejecimiento, 589
observación y medición de la cristalinidad en polímeros, 590-591
polietileno resistente al impacto, 592-593
polímeros líquidos, 589
relaciones estructura-propiedades, 583-587
temperatura de degradación, 588-589
temperatura de transición del vidrio, 590
Termoplásticos, propiedades mecánicas, 593-597
comparación, 594-595
comportamiento de impacto, 597
comportamiento plástico de amorfos, 593-594
comportamiento viscoelástico, 593
deformación de polímeros cristalinos, 597
temperatura de deflección, 596-597
temperatura de distorsión, 596
tiempo de relajación, 596
Termoplásticos comunes, 581-583
estructuras complejas, 581
propiedades, 581
unidades repetidas, 582-583
Tiempo
de solidificación y tamaño dendrítico, 314-318
y difusión, 157-158
Trabajo en caliente, 291-292
Trabajo en frío
características, 282-284
propiedades frente al porcentaje de, 276-278
relación del con la curva de esfuerzo-deformación, 270-274
Transformaciones alotrópicas y polimórficas, 66
Transistores, 700
Transmisión, 762-764
celdas solares, 763-764
fotoconducción, 763

Tratamientos superficiales, 482-483
Tratamientos térmicos
de templado y revenido, 471-475
isotérmicos
simples, 465-467
Tubérculos, 814

U

Unidades, 188
Unión de materiales metálicos, 333-334
Uretanos, 604

V

Vacancias, 105
Valencia, 27-28
Velocidad de difusión, 149-150
Vidrio
cerámico, 312, 557-558
composiciones, 557
diseño, 554
Vidrios
cerámicos, 557-559
inorgánicos, 551-557
metálicos voluminosos, 210-212
Viscosidad, 215
Vitrificación, 559
Vulcanización, 598

Z

Zona
afectada por el calor, 290-291
de fusión, 333
equiaxial, 321

Los materiales son un componente de habilitación de lo que los ingenieros pueden imaginar, diseñar y construir. En el límite de la innovación nos encontramos con el descubrimiento o la creación de materiales totalmente nuevos, lo que a menudo es posible gracias a modernas técnicas de procesamiento, que aluden al equilibrio para hacer que los materiales existan en estados metaestables, así como el desarrollo de herramientas para ensamblar, formar y estudiar los materiales a nanoescala.

En la actualidad resulta rutinario analizar la estructura y composición de los materiales a nivel casi atómico, aplicar técnicas como la microscopía de alta resolución electrónica de transmisión, la incidencia rasante de difracción de rayos X y la espectroscopía de pérdida de energía de electrones. Al mismo tiempo, el procesamiento de los materiales ha avanzado hasta el punto en que se pueden generar o depositar láminas delgadas de sólo unas capas atómicas de grosor y fabricar estructuras tridimensionales con dimensiones de decenas de nanómetros o menos. Toda la industria de la electrónica se basa en estos avances.

Lo nuevo en esta edición

- Se incorporan nuevos problemas al final de cada capítulo, hasta incrementar 15% el número de los mismos.
- En el capítulo 15 se ha ampliado el contenido sobre los materiales cerámicos para incluir las cerámicas cristalinas, el sílice y los silicatos, entre otros temas de interés, con la finalidad de proporcionar una visión más completa de esta clase de materiales tan importantes para la ingeniería.
- En el capítulo 14 se actualizó el costo de los materiales comunes en ingeniería.
- Esta edición ha sido adaptada para incorporar en ella el Sistema Internacional de Unidades (Le Système International d'Unité o SI).

CENGAGE Learning®

Visite nuestro sitio en http://latinoamerica.cengage.com

ISBN-13: 978-607-526-063-1
ISBN-10: 607-526-063-3

9 786075 260631